

Хейн Вин Зо
Hein Win Zaw

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ
РОТАЦИОННОЙ РАСКАТКЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК**

**STUDIES OF THE CONTACT PRESSURE WITH SYMMETRICAL ROLLING ROTARY
TUBULAR BLANKS**

Хейн Вин Зо – кандидат технических наук, кафедра «Технология производства летательных аппаратов» «МАТИ» – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (Россия, Москва); тел. 8(985)3101319. E-mail: taryar4ever@gmail.com.

Mr. Hein Win Zaw – PhD in Engineering, Department «Technology of production of aircraft», MATI – Russian State Technological University K. E. Tsiolkovsky (Russia, Moscow); tel. 8(985)3101319. E-mail: taryar4ever@gmail.com.

Аннотация. Работа посвящена исследованиям напряжений в очаге деформации трубчатых заготовок в процессе раскатки, приведены рекомендации при расчёте технологических процессов симметричной раскатки трубчатых заготовок, сделан вывод о зависимости контактных напряжений от контактных давлений, действующих со стороны подпора.

Summary. The article is devoted to research of stress in the deformation zone of tubular billet during rolling, consider the recommendations in the calculation processes symmetrical rolling tube blanks, made the conclusions that the contact stress depends on the contact pressure exerted by the backwater.

Ключевые слова: контактные напряжения, контактные давления, очаг деформации, зона опережения, зона отставания, зона ускорения, зона торможения.

Key words: contact stress, contact pressure, the deformation zone, a zone of advancing, zone lag, acceleration zone, a zone of inhibition.

УДК 621.7.04

Существующие операции обработки металлов давлением при обжиге и раздаче трубчатых заготовок с использованием жёстких штампов, эластичных сред, высокоимпульсных токов имеют недостатки, связанные с используемыми большими усилиями и низкими степенями формоизменения заготовок. В связи с этим определённый интерес представляют процессы обработки трубчатых заготовок методами ротационной вытяжки, раскатки, обжима, т.е. процессы локального деформирования заготовок.

На современном этапе создания авиационной и ракетно-космической техники большое внимание уделяется процессам технологической подготовки производства и в частности автоматизированным системам технологической подготовки производства. Данный этап характеризуется большой трудоёмкостью, которая связана с тем, что при подготовке производства к выпуску новой продукции редко представляется возможным точно оценить технологичность конструкции и возможность её изготовления на конкретном производственном оборудовании, например, при формообразовании исходной заготовки оценить предельные деформации. Поэтому необходимо правильно выбрать методы обработки для достижения предельных деформаций уже на ранних этапах создания авиационной техники. Для этого необходимо провести исследования возможностей деформирования, провести математическое моделирование процесса и выработать рекомендации по применимости того или иного процесса. Это снизит трудоёмкость изготовления за счёт сокращения времени на технологические операции и переходы. В связи с этим представляются весьма актуальными исследо-

вания в области локального деформирования при формообразовании трубчатых заготовок методами ротационного обжима и раздачи, которые увеличивают предельные деформации заготовок.

В данной работе рассмотрим симметричный процесс раскатки трубчатых заготовок (см. рис. 1). Введём основные предположения и допущения [1; 2]:

- деформированное состояние принимаем плоское, т.е. $\varepsilon_z = 0$;
- кривизну исходной заготовки принимаем намного меньше кривизны оправок;
- относительно срединной плоскости заготовки принимаем, что очаг деформации симметричный;
- за границами локальных зон деформации напряжения σ_p не равны нулю;
- контактное трение достигает максимальных величин в зонах торможения и ускорения (прилипания);
- принимаем, что закон Амонтона-Кулона распространяет своё действие на контактное трение в зонах отставания и опережения.

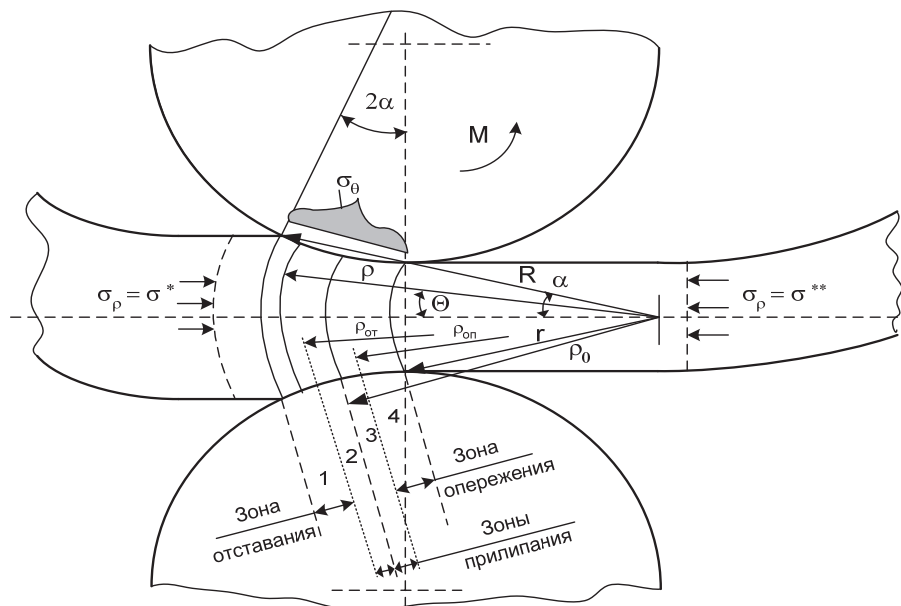


Рис. 1. Расчётная схема при симметричной раскатке для определения σ_θ

Решим задачу симметричной ротационной раскатки трубчатых заготовок в следующей последовательности.

Условно разделим всю зону контакта инструмента и заготовки на 4 зоны (см. рис. 1):

- 1-я зона – отставания;
- 2-я зона – торможения;
- 3-я зона – ускорения;
- 4-я зона – опережения.

Исходя из предположений и допущений, примем, что на зоны 1 и 4 распространяется закон Амонтона-Кулона, в зонах 2 и 3 контактное трение максимально.

Приведём уравнения для зоны отставания (см. рис. 2). Для данной задачи уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0. \quad (1)$$

Запишем в приближённом виде уравнение пластичности:

$$\sigma_S = \sigma_\rho - \sigma_\theta. \quad (2)$$

Запишем касательные напряжения, которые возникают от сил контактного трения:

$$\tau_k = \tau_{\rho\theta} = -\mu |\sigma_\theta|.$$

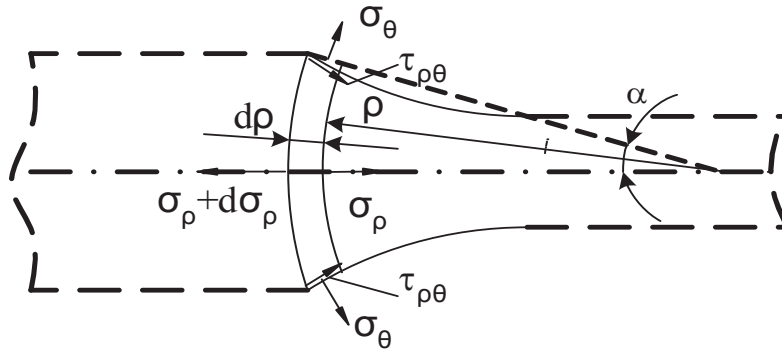


Рис. 2. Схема контактных давлений в зоне 1

Решим совместно уравнения (1) и (2), определим контактное давление σ_θ :

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_S - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0,$$

где $|\sigma_\theta| = \sigma_S - \sigma_\rho$.

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_S}{\rho} - \frac{\mu}{\rho\alpha} (\sigma_S - \sigma_\rho) = 0;$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_S}{\rho} - \frac{\mu\sigma_S}{\rho\alpha} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = 0;$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = \frac{\sigma_S}{\rho} \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right). \quad (3)$$

Полученное выражение (3) относится к дифференциальным уравнениям типа $y' + P(x)y = Q(x)$, которые решаются по формуле

$$y = \left[\int dx Q(x) e^{\int P(x) dx} + C1 \right] e^{-\int P(x) dx}.$$

Приведём общее решение уравнения (3):

$$\sigma_\rho = \left[\int d\rho \frac{\sigma_S}{\rho} \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) e^{\int \frac{\mu d\rho}{\rho\alpha}} + C1 \right] e^{-\int \frac{\mu d\rho}{\rho\alpha}};$$

$$\sigma_\rho = \left[\int d\rho \frac{\sigma_S}{\rho} \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \rho^{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= \left[\sigma_S \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \int^{\frac{\mu}{\alpha}-1} \rho d\rho + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}} ; \\ \sigma_{\rho} &= \left[\sigma_S \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \frac{\rho^{\frac{\mu}{\alpha}}}{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}} ; \\ \sigma_{\rho} &= \sigma_S \left(\frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}} ; \\ \sigma_{\rho} &= \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + C1 \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}} .\end{aligned}\tag{4}$$

Из граничных условий определим C1: $\sigma_{\rho} = \sigma^*$ при $\rho = R$ (см. рис. 1). Получаем

$$C1 = \sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}} .$$

Подставим C1 в уравнение (4) и получим

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \left[\sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] \rho^{\frac{\mu}{\alpha}} ; \\ \sigma_{\rho} &= \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} ; \\ \sigma_{\rho} &= \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} .\end{aligned}\tag{5}$$

Из приближённого условия пластичности (2) получим, что $\sigma_{\theta} = \sigma_{\rho} - \sigma_S$. Воспользуемся уравнением (5) и получим

$$\sigma_{\theta} = \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - \sigma_S + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} .$$

Проведя преобразования, приведём выражение к виду

$$\sigma_{\theta} = \sigma_S \left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} ,$$

где $\sigma_S = \text{const}$; σ^* – величина подпора со стороны входа края трубчатой заготовки в зону локальных деформаций.

Как уже было допущено выше, в зоне прилипания-торможения (зона 2) принимаем, что величины контактного трения достигают максимальных значений (см. рис. 3). Приведём уравнения для данного случая.

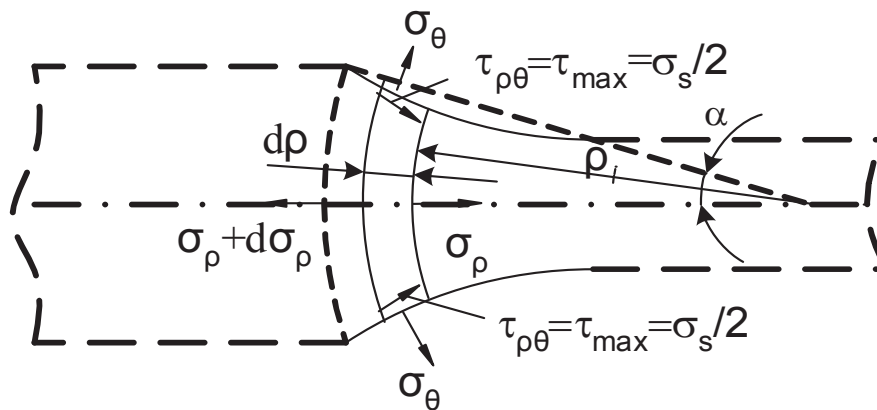


Рис. 3. Схема для расчёта контактных давлений в зоне 2

Для данной задачи в зоне 2 уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0. \quad (6)$$

Запишем условие пластичности [1]:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (7)$$

Условие (7) было взято из формулы $(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\rho\theta}^2 = \sigma_S^2$, если $\tau_{\rho\theta} \rightarrow \tau_{\max} = \frac{\sigma_S}{2}$.

Из (6) и (7) имеем $\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0$, где $\tau_{\max} = \frac{\sigma_S}{2}$.

Далее получим

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\sigma_S}{2\alpha} = 0; \quad \int_{\sigma_{\rho_{от}}}^{\sigma_\rho} d\sigma_\rho = \frac{\sigma_S}{2\alpha} \int_{\rho_{от}}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho}; \quad \sigma_\rho - \sigma_{\rho_{от}} = \frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \frac{\rho}{\rho_{от}}.$$

Окончательно запишем распределение радиальных напряжений в следующем виде:

$$\sigma_\rho = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \left(\frac{\rho_{от}}{\rho} \right) + \sigma_{\rho_{от}}.$$

Из условия (7) следует, что $\sigma_\theta = \sigma_\rho$. Определим величину контактных давлений:

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \left(\frac{\rho_{от}}{\rho} \right) + \sigma_{\rho_{от}}, \quad (8)$$

Хейн Вин Зо

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ РОТАЦИОННОЙ РАСКАТКЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

где, в соответствии с (8), $\sigma_{\rho_{от}} = \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_S + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$.

Для зоны прилипания-ускорения (зона 3) также принимаем (см. рис. 4), что величины контактного трения максимальны. Приведём уравнения для данного случая.

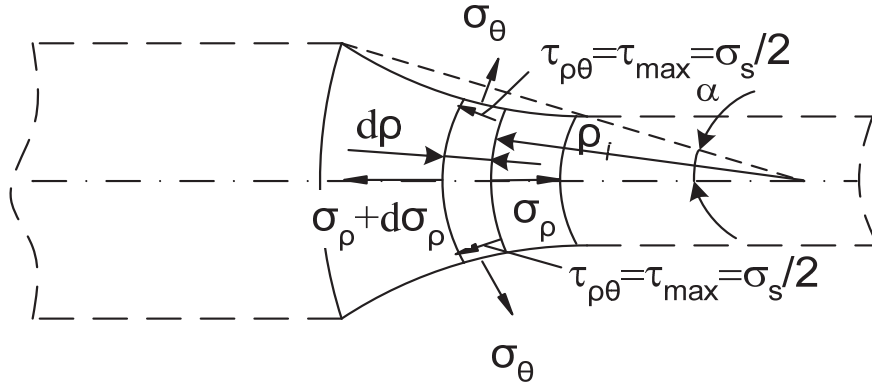


Рис. 4. Схема для расчёта контактных давлений в зоне 3

Запишем уравнения равновесия:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta + \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0, \quad (9)$$

где $\tau_{\max} = \frac{\sigma_S}{2}$.

Запишем условие пластичности как для прошлого случая (7): $\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0$.

Решаем совместно (9) и (7), получаем

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0; \quad \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_S}{\rho 2\alpha} = 0; \quad \int_{\sigma_{\rho_{оп}}}^{\sigma_\rho} d\sigma_\rho = \frac{\sigma_S}{2\alpha} \int_{\rho_{оп}}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho};$$

$$\sigma_\rho - \sigma_{\rho_{оп}} = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \frac{\rho}{\rho_{оп}}; \quad \sigma_\rho = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{оп}}\right) + \sigma_{\rho_{оп}}.$$

Из условия $\sigma_\theta = \sigma_\rho$ получим

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{оп}}\right) + \sigma_{\rho_{оп}},$$

где, согласно (5), $\sigma_{\rho_{оп}} = \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1\right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{оп}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_S + \sigma^{**} \left(\frac{\rho_{оп}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$.

Выведем систему уравнений для зоны опережения (зона 4) (см. рис. 5).
Рассчитаем касательные напряжения:

$$\tau_k = \tau_{\rho\theta} = +\mu|\sigma_\theta|. \quad (10)$$

По аналогии с решением для зоны 1 решим совместно (2) и (10):

$$\sigma_\rho = \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1\rho^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (11)$$

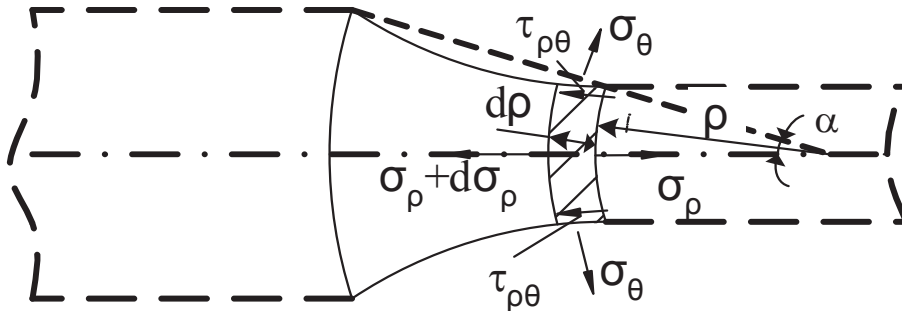


Рис. 5. Схема для расчёта контактных давлений в зоне 4

Из граничных условий найдём постоянную C1: $\sigma_\rho = \sigma^{**}$ при $\rho = r$ (см. рис. 1). Полу-

чим $\sigma^{**} = \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1r^{\frac{\mu}{\alpha}};$

$$C1 = \sigma^{**} r^{-\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) r^{-\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (12)$$

Подставим уравнение (12) в (11) и окончательно получим

$$\sigma_\rho = \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^{**} \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Рассчитаем искомую величину σ_θ для зоны 4 из условия пластичности:

$$\sigma_\theta = \sigma_S \left\{ \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}, \quad (13)$$

где $\sigma_S = \text{const}$ (как средняя подинтегральная величина); σ^{**} – величина усилий со стороны подпора (область выхода заготовки из очага).

Таким образом, мы определили контактные давления в локальных зонах 1, 2, 3 и 4. Для указанных зон необходимо определить внутренние границы.

Если учесть, что в зонах 1 и 2 ($\rho = \rho_{от}$) имеют место быть одинаковые условия контактного трения, получим, что $|\sigma_\theta|\mu = \frac{\sigma_S}{2}$. Для положительного σ_θ имеем

Хейн Вин Зо**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ РОТАЦИОННОЙ РАСКАТКЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК**

$$\left| \sigma_S \left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{от}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{от}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right| \mu = \frac{\sigma_S}{2}.$$

Для отрицательного значения σ_θ

$$\left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{от}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \frac{\sigma^*}{\sigma_S} \left(\frac{R}{\rho_{от}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} = \frac{-1}{2\mu}. \quad (14)$$

Рассчитаем соотношение радиусов зоны 1 из уравнения (14). Имеем следующее соотношение:

$$\left(\frac{R}{\rho_{от}} \right) = \left(\frac{\frac{1-2\alpha}{2\mu}}{1 - \frac{\alpha}{\mu} - \frac{\sigma^*}{\sigma_S}} \right)^{\frac{\alpha}{\mu}}.$$

Рассмотрим несколько примеров для различных соотношений напряжений в зонах контакта, углов выхода и коэффициента Пуассона:

1) при $\sigma^* / \sigma_S = 0$; $\alpha = 0,1$; $\mu = 0,3$ получим

$$\left(\frac{R}{\rho_{от}} \right) = \left(\frac{\frac{1-2\alpha}{2\mu}}{1 - \frac{\alpha}{\mu}} \right)^{\frac{\alpha}{\mu}} = \left(\frac{1-2 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,3} \right)^{\frac{0,1}{0,3}} = \left(\frac{1-0,2}{0,6} \right)^{0,33} = 1,25.$$

2) при $\sigma^* / \sigma_S = -0,2$; $\alpha = 0,1$; $\mu = 0,3$ получим

$$\left(\frac{R}{\rho_{от}} \right) = \left(\frac{1-0,2}{0,6+0,2} \right)^{0,33} = 1,15.$$

Обратим внимание на зону границы входа материала заготовки в очаг деформации (зона 1). Из данного расчёта очевидно, как влияет напряжение $\sigma_p = \sigma^* \neq 0$ на размер зоны 1. Это влияние является достаточно значимым.

По предыдущим условиям найдём размер зоны опережения (зона 4):

$$\left| \sigma_S \left\{ \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left(\frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right| \mu = \frac{\sigma_S}{2}.$$

Получим

$$\left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right) = \left[\frac{\frac{1+2\alpha}{2\mu}}{\left(\frac{\alpha}{\mu}+1\right) - \frac{\sigma^{**}}{\sigma_S}} \right]^{\frac{\alpha}{\mu}}. \quad (15)$$

Определим влияние усилия со стороны подпора σ^{**} на размеры зоны 4 (см. рис. 1) из следующих сочетаний факторов:

1) при $\sigma^{**} / \sigma_S = 0$, $\alpha = 0,1$; $\mu = 0,3$ из (15) получаем $\left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right) = 1,145$;

2) при $\sigma^{**} / \sigma_S = -0,2$, $\alpha = 0,1$; $\mu = 0,3$ получаем $\left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right) = 1,09$.

Таким образом, влияние усилий со стороны подпора более существенно со стороны входа (больше примерно в 2 раза), чем со стороны выхода.

Исходя из предположения, что контактные усилия максимальны в зонах 2 и 3, определим радиус нейтрального сечения ρ_0 . Воспользуемся выражениями (12) и (13):

$$\begin{aligned} & -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_{\text{от}}}{\rho_0}\right) + \sigma_S \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{\text{от}}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_S + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{\text{от}}}\right) = \\ & = -\frac{\sigma_S}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\text{оп}}}\right) + \sigma_S \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1\right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_S + \sigma^{**} \left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Преобразуем уравнение (16) к окончательному виду:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\rho_{\text{от}}\rho_{\text{оп}}}{\exp(A)}}, \quad (17)$$

где $A = 2\alpha \frac{\sigma^*}{\sigma_S} \left(\frac{R}{\rho_{\text{от}}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}} - 2\alpha \frac{\sigma^{**}}{\sigma_S} \left(\frac{\rho_{\text{оп}}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$.

При отсутствии усилий со стороны подпора $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ определим нейтральный радиус из выражения (17): $\rho_0 = \sqrt{\rho_{\text{от}}\rho_{\text{оп}}}$.

Графики распределения контактных давлений в зависимости от режимов обработки приведены на рис. 6-9. Таким образом, можно сделать выводы о зависимости контактных давлений от величины напряжений подпора.

Вывод

Из графиков на рис. 6-9 следует, что исходя из геометрических параметров очага локальной деформации и величины сжимающих напряжений со стороны подпора σ^* и σ^{**} контактное давление увеличивается до 50 % к нейтральному радиусу. При этом в большей части увеличение контактного давления зависит от величины сжимающих напряжений подпора.

Хейн Вин Зо

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ РОТАЦИОННОЙ РАСКАТКЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

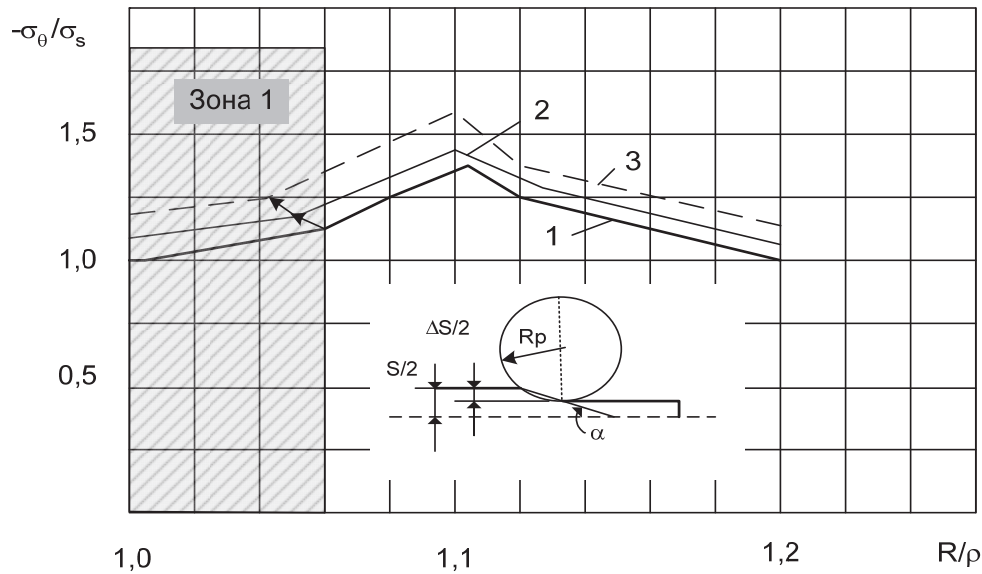


Рис. 6. График зависимости контактных давлений от величины сжимающих напряжений со стороны подпора ($\alpha / \mu = 0,225; S / 2 = 1,0 \text{ мм}, \Delta S / 2 = 0,2 \text{ мм}, R\rho = 12 \text{ мм}$):

$$1 - \sigma^* = \sigma^{**} = 0; \quad 2 - \sigma^* / \sigma_S = \sigma^{**} / \sigma_S = -0,1; \quad 3 - \sigma^* / \sigma_S = \sigma^{**} / \sigma_S = -0,2$$

Отталкиваясь от схем для расчёта контактных напряжений можно сделать вывод, что контактное давление – величина непостоянная. Тем не менее на всём протяжении геометрии локальной деформации она выше предела текучести материала в пределах 30-40 %. Это обстоятельство следует учитывать при расчётах технологических параметров процесса раскатки.

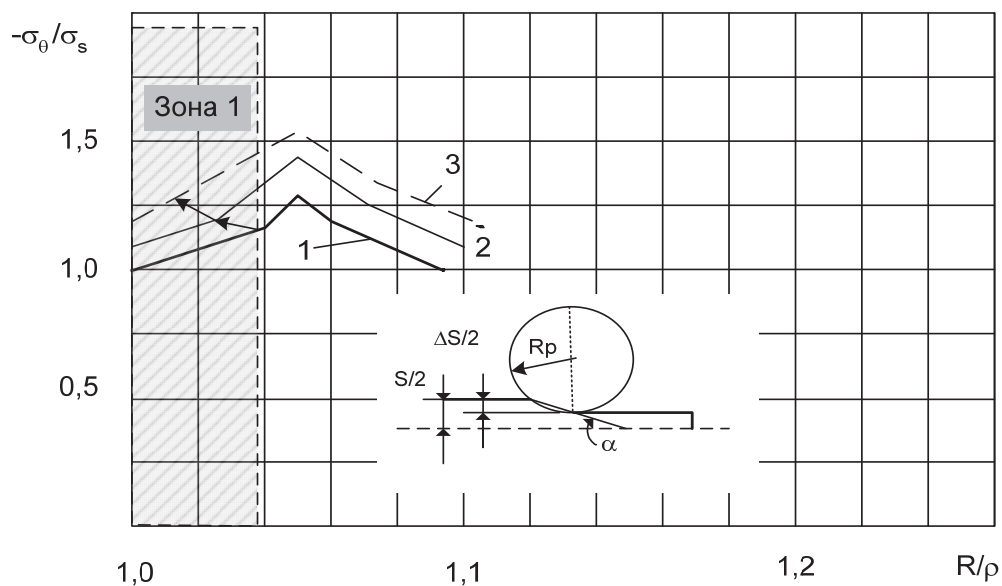


Рис. 7. График зависимости контактных давлений от величины сжимающих напряжений со стороны подпора ($\alpha / \mu = 0,1625; S / 2 = 1,0 \text{ мм}, \Delta S / 2 = 0,1 \text{ мм}, R\rho = 12 \text{ мм}$):

$$1 - \sigma^* = \sigma^{**} = 0; \quad 2 - \sigma^* / \sigma_S = \sigma^{**} / \sigma_S = -0,1; \quad 3 - \sigma^* / \sigma_S = \sigma^{**} / \sigma_S = -0,2$$

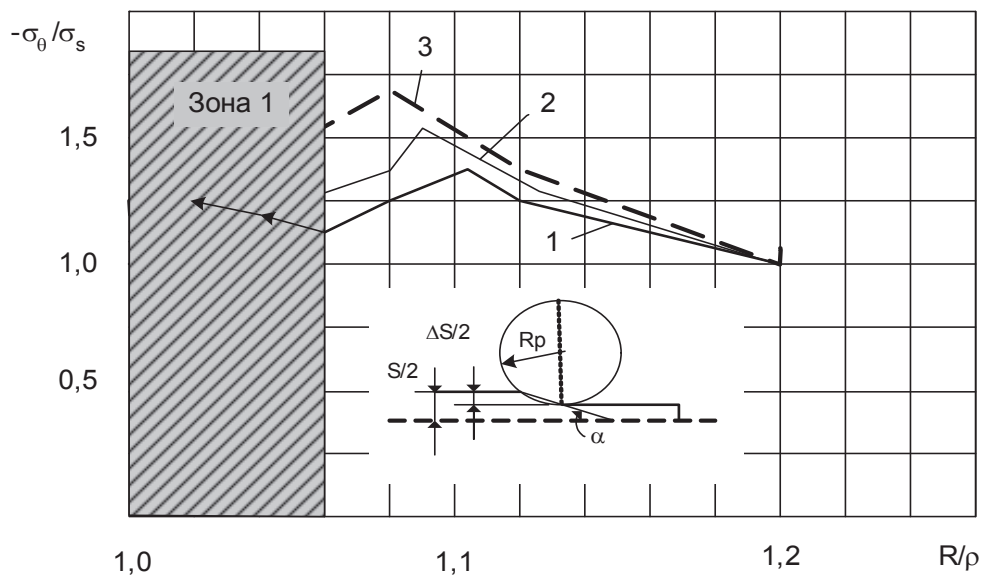


Рис. 8. График зависимости контактных давлений от величины сжимающих напряжений со стороны подпора ($\alpha / \mu = 0,225$; $S / 2 = 1,0$ мм, $\Delta S / 2 = 0,2$ мм, $R\rho = 12$ мм) :

$$1 - \sigma^* = \sigma^{**} = 0; \quad 2 - \sigma^* / \sigma_S = -0,1; \quad 3 - \sigma^* / \sigma_S = -0,2$$

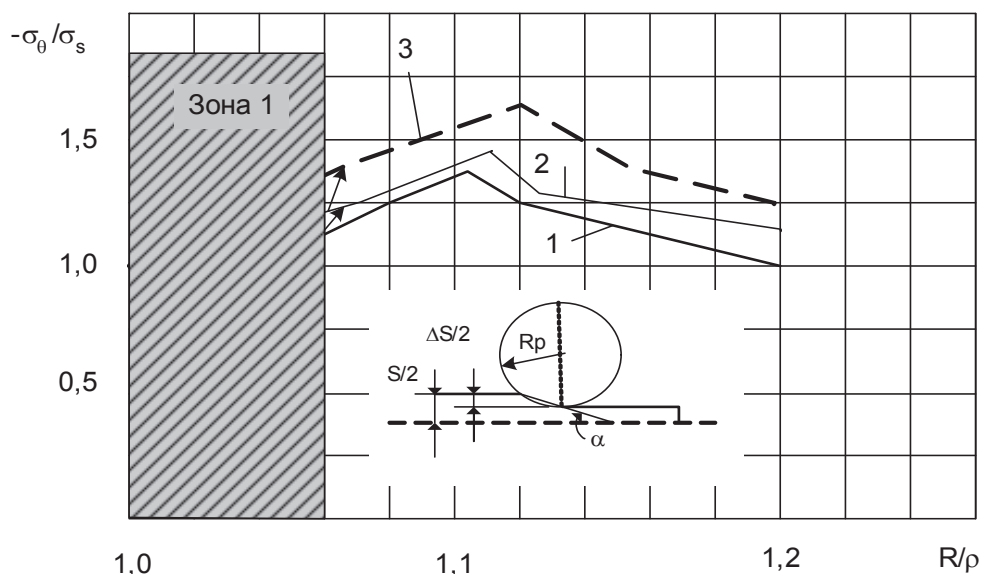


Рис. 9. График зависимости контактных давлений от величины сжимающих напряжений со стороны подпора ($\alpha / \mu = 0,225$; $S / 2 = 1,0$ мм, $\Delta S / 2 = 0,2$ мм, $R\rho = 12$ мм) :

$$1 - \sigma^* = \sigma^{**} = 0; \quad 2 - \sigma^{**} / \sigma_S = -0,1; \quad 3 - \sigma^{**} / \sigma_S = -0,2$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумадин, А. С. Раскатка концевых участков труб / А. С. Чумадин, Хейн Вин Зо, М. В. Бондаренко // Новые материалы и технологии: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 21-23 нояб. 2006 г. В 3 т. – М.: ИЦ МАТИ, 2006. – Т. 2. – С. 46-47.
2. Хейн Вин Зо Экспериментальные исследования процесса раскатки труб / Хейн Вин Зо // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 12. – С. 11-14.

Черный С. П., Землянская Е. Н., Филатова А. С.
S. P. Cherny, E. N. Zemlyanskaya, A. S. Filatova

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
С МНОГОКАСКАДНЫМ НЕЧЁТКИМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ**

**SIMULATION OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS WITH MULTISTAGE FUZZY
PID-REGULATOR**

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

Sergei P. Cherny – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of «Electric drive and automation of industrial plants», Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: keparu@knastu.ru.

Землянская Екатерина Николаевна – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия). E-mail: ien311@mail.ru.

Mrs. Ekaterina N. Zemlyanskaya – Senior Lecturer, Department of «Electric drive and automation of industrial plants», Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: ien311@mail.ru.

Филатова Анна Сергеевна – бакалавр кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия). E-mail: keparu@knastu.ru.

Ms. Anna S. Filatova – bachelor, Department of «Electric drive and automation of industrial plants», Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: keparu@knastu.ru.

Аннотация. В работе проведён анализ переходных процессов модели системы управления объектом третьего порядка с отрицательной обратной связью и ПИД-законом регулирования, модели системы с нечётким логическим регулятором и модели системы управления с многокаскадным нечётким логическим регулятором.

Summary. The paper proposes analysis for transient processes management system model of the third order with negative feedback and PID-control law, the system model with fuzzy logic control and management system model with multi-stage fuzzy logic controller.

Ключевые слова: модель, переходной процесс, многокаскадный нечёткий регулятор.

Key words: model, transient processes, process multi-stage fuzzy controller.

УДК 681.5.01

Существующие на сегодняшний день системы регулирования, реализованные с использованием принципов нечёткой логики, находят всё большее применение во многих сферах человеческой деятельности. Одним из направлений развития таких интеллектуальных систем является их применение в технике, а именно в различных отраслях промышленности [3].

Для управления основными параметрами технологических процессов и сложных систем в подавляющем большинстве применяются регуляторы, реализующие классический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления. Реализация именно ПИД-закона при синтезе систем автоматического управления для сложных нетрадиционных объектов, отличающихся по физической природе, свойствам и назначению, доказывает их основное свойство – универсальность. Возникновение необходимости управления

сложными объектами, для которых традиционная схема регулирования не формализуема, не реализуема, либо представляется не оправданно сложной, предопределило развитие таких схем и структур, которые подразумевают использование принципов интеллектуальности, например, нечётких систем [1].

Рассмотрим математическую модель системы управления объектом третьего порядка с отрицательной обратной связью и ПИД-законом регулирования (см. рис. 1).

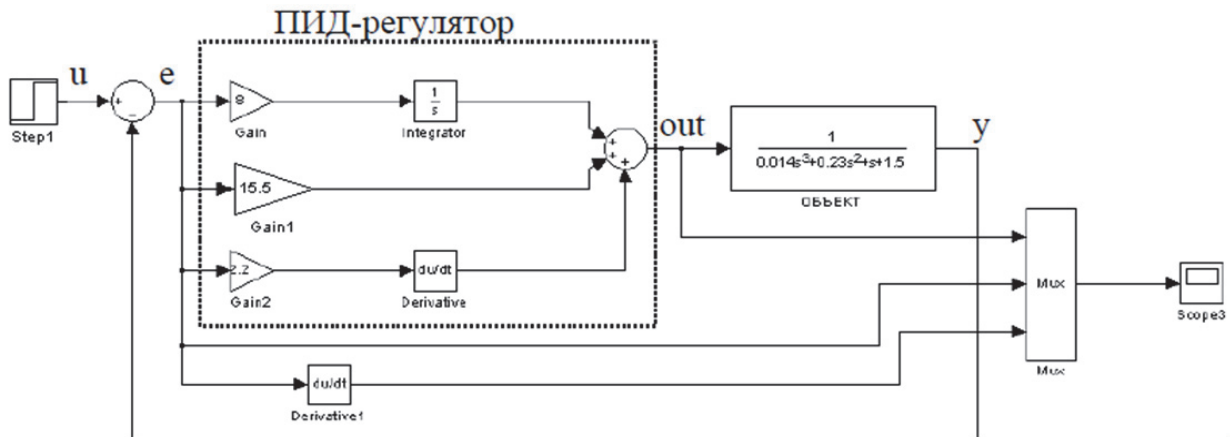


Рис. 1. Система управления с ПИД-регулятором

На рис. 2 представлены переходные процессы в классической системе управления при её реакции на единичный ступенчатый сигнал и неизменных параметрах объекта регулирования, по ошибке, производной ошибки и выходной координате.

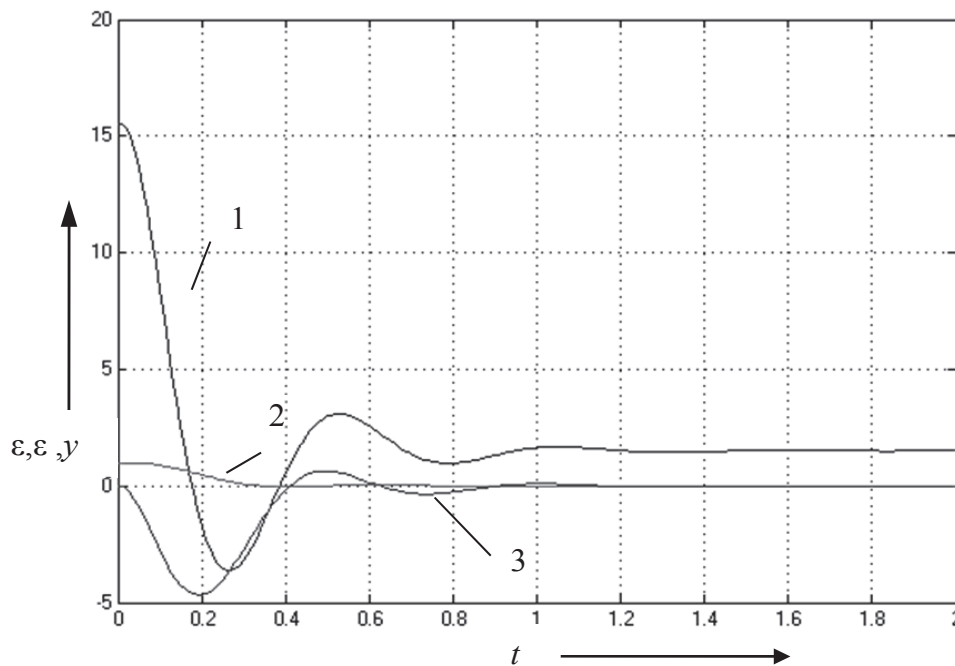


Рис. 2. Графики переходных процессов в системе с классическим ПИД-регулятором:
1 – выход регулятора; 2 – ошибка; 3 – производная ошибки

Основным недостатком системы стабилизации, представленной на рис. 1, является сравнительно невысокая динамическая точность при действии недетерминированных воз-

мущений и изменениях параметров объекта управления. Для повышения динамической точности таких нестационарных объектов регулирования целесообразно вместо классического ПИД-регулятора использовать систему с нечёткими логическими регуляторами (НЛР) [4] в каждом канале управления (см. рис. 3).

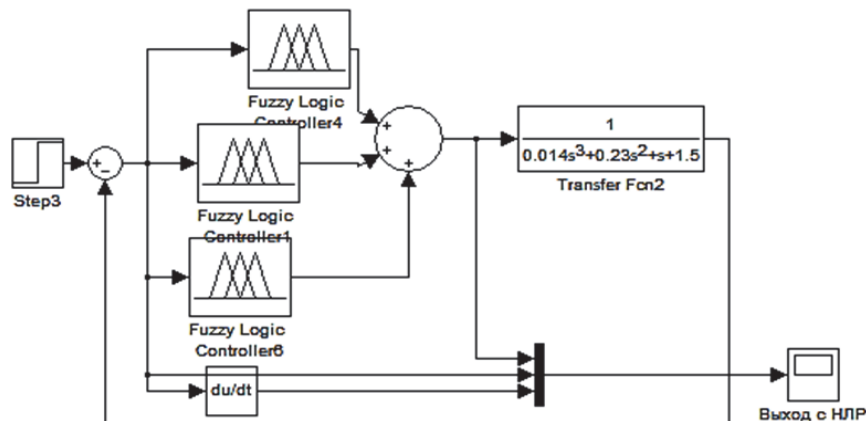


Рис. 3. Структурная схема нечёткой системы управления

Синтезированный нечёткий регулятор в пропорциональном канале управления в базе своей имеет алгоритм нечёткого логического вывода Сугено и единственные лингвистические переменные на входе и выходе. Базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне пяти переменных. Диапазоны изменения входных переменных получены по результатам моделирования ПИД-регулятора с классической схемой управления, приведённой на рис. 1. Вид термов для лингвистической переменной «ошибка» представлен на рис. 4. Аналогичным образом формируются нечёткие элементы для интегрального и дифференциального каналов управления в нечётком ПИД-регуляторе (см. рис. 3).

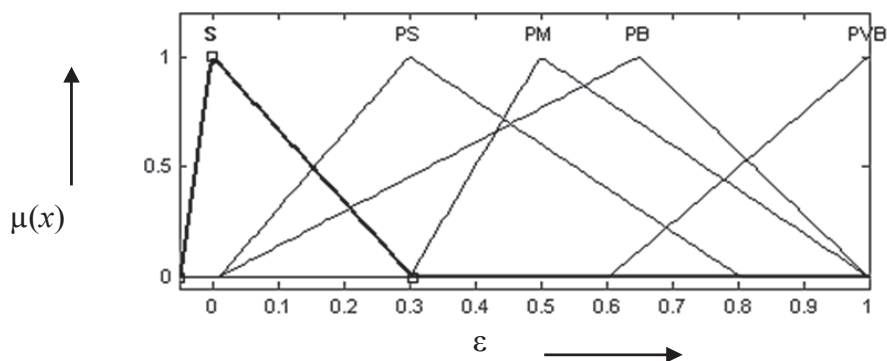


Рис. 4. Базовое терм-множество лингвистической переменной «ошибка»

Терм-множество выходной лингвистической переменной ограничим тремя сингледами, выбор которых производится с учётом диапазона изменения сигнала управления «out» (см. рис. 1).

Основным содержательным компонентом блока нечёткого вывода, определяющим его функциональную ориентированность, является база знаний НЛР, которая строится на основании цели его применения и проходит обязательную проверку на полноту и непротиворечивость.

График переходных процессов в системе с нечётким ПИД-регулятором представлен на рис. 5.

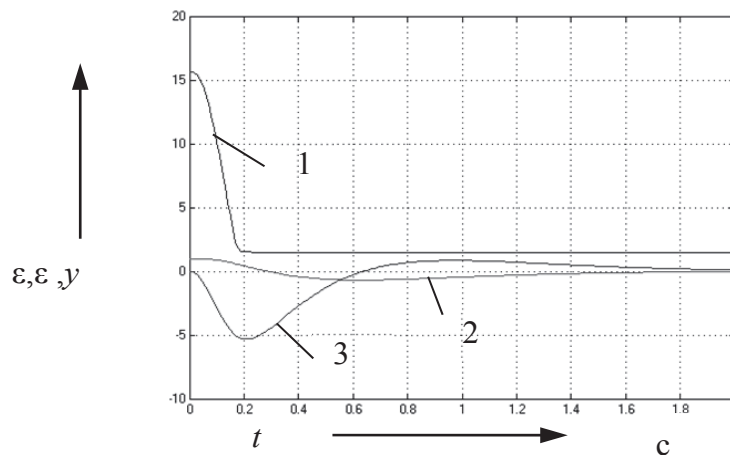


Рис. 5. График переходных процессов в системе с нечётким ПИД-регулятором:
1 – выход регулятора; 2 – ошибка; 3 – производная ошибки

Полученная интеллектуальная система (см. рис. 5) обладает улучшенными основными показателями качества в сравнении с системой, реализующей классический ПИД-закон управления, в частности длительность переходного процесса сократилась в 6 раз. Использование методов нечёткого управления позволяет получить качество переходных процессов, протекающих в объекте регулирования, без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классического метода управления.

Для увеличения адаптивной составляющей и повышения интеллектуальности была реализована многокаскадная нечёткая система регулирования путём добавления дополнительного нечёткого элемента в систему. Структурное решение, реализующее многокаскадный нечёткий логический контроллер (см. рис. 6), представляет собой внедрение управляющего НЛР, установленного последовательно в канал управления [2]. Таким образом, интеллектуальные свойства внешнего нечёткого регулятора дают возможность формировать корректирующее воздействие на каждый локальный канал управления. Кроме того, такая интеллектуальная система будет использовать синтезированные ранее нечёткие логические регуляторы для пропорционального и интегрального каналов управления соответственно.

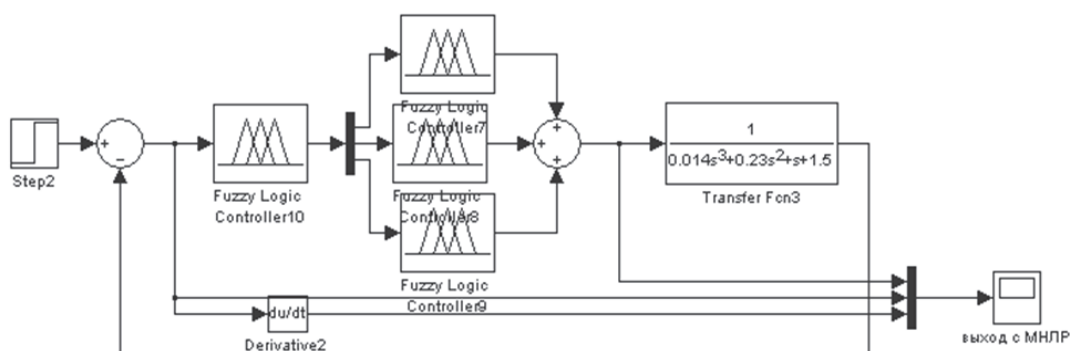


Рис. 6. Структурная схема многокаскадной нечёткой системы управления

Такая система должна обеспечить формирование улучшения качества переходных характеристик рассматриваемых каналов в системе с ПИД-регулятором и в системе, реализующей традиционный закон регулирования. Функциональная схема многокаскадного нечёткого логического регулятора (МНЛР) представлена на рис. 7.

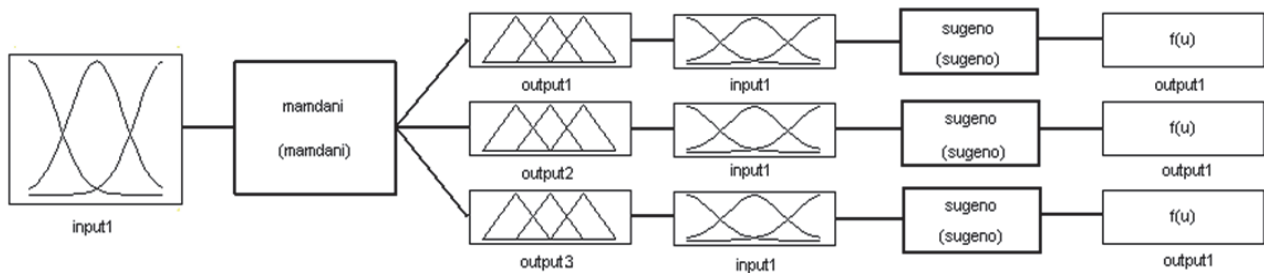


Рис. 7. Функциональная схема МНЛР

При синтезе нечёткого регулятора используем алгоритм вывода по Мамдани как наиболее простой и интуитивный.

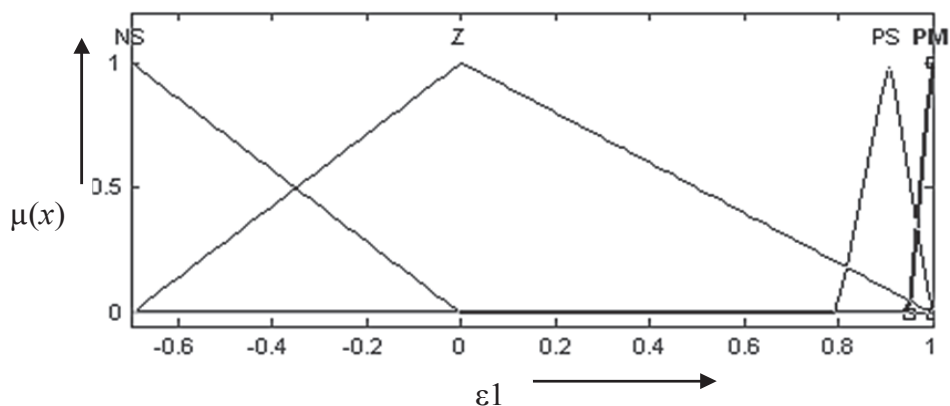


Рис. 8. Базовое терм-множество лингвистической переменной «ошибка»

Добавленный в систему управления регулятор, реализованный с использованием алгоритма вывода Мамдани, состоит из одного входа и трёх выходов, вырабатывающих сигнал коррекции, каждый на собственный канал регулирования. Базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне четырёх, диапазоны изменения параметров регулируемых величин получены из результатов моделирования системы с классическим ПИД-регулятором (см. рис. 1). Далее на рисунках представлены терм-множества лингвистических переменных, формализующих понятия «ошибка» системы (см. рис. 8), пропорциональная составляющая сигнала управления (см. рис. 9), интегральная составляющая сигнала управления (см. рис. 10) и дифференциальная составляющая сигнала управления (см. рис. 11) соответственно.

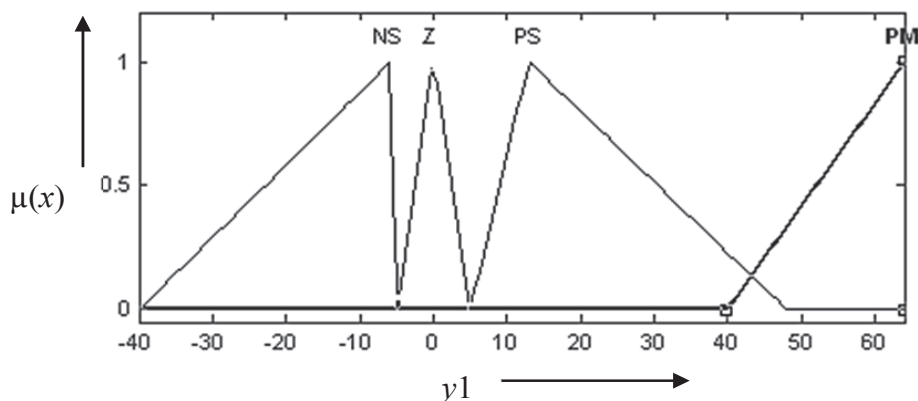


Рис. 9. Базовое терм-множество, соответствующее пропорциональной составляющей сигнала управления

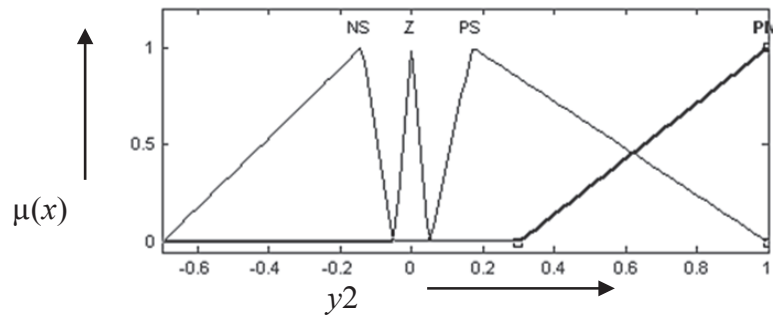


Рис. 10. Базовое терм-множество, соответствующее интегральной составляющей сигнала управления

Представленное структурное решение при синтезе нечёткой системы управления позволяет получить регулятор с переменным законом регулирования от чисто пропорционального до ПИД в зависимости от требований технологического процесса или объекта, функционирующего в условиях неопределённости и неполноты. Графики переходных процессов системы представлены на рис. 12.

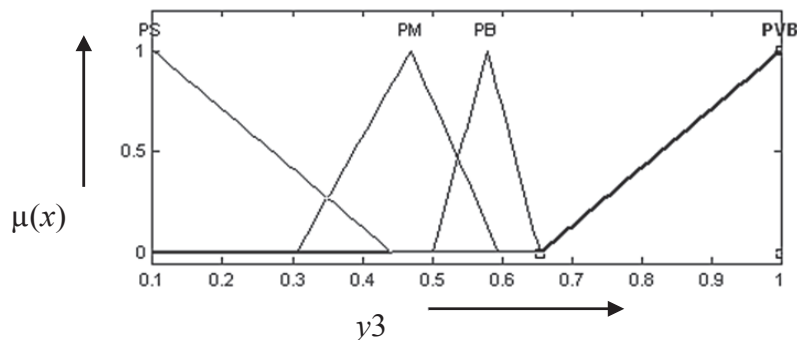


Рис. 11. Базовое терм-множество, соответствующее дифференциальной составляющей сигнала управления

Из графика видно значительное уменьшение времени переходного процесса в системе с многокаскадным нечётким регулятором по сравнению с классической системой и системой с НЛР. Длительность переходного процесса уменьшилась в 10 раз по сравнению с классической системой и в 2 раза по сравнению с системой с НЛР.

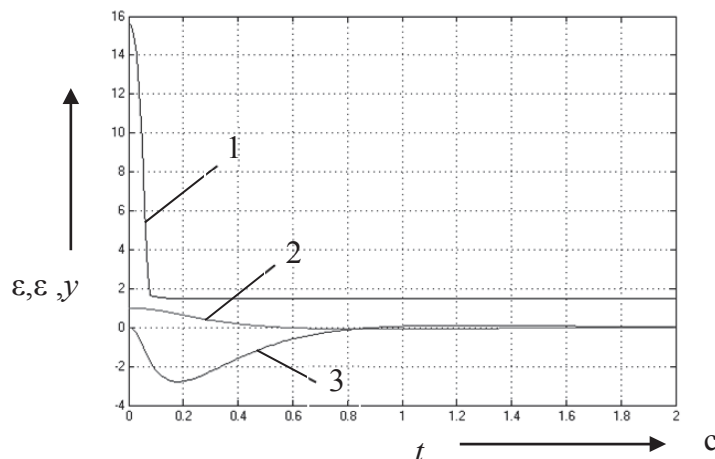


Рис. 12. Графики переходных процессов измеряемых величин в системе с МНЛР: 1 – выход регулятора; 2 – ошибка; 3 – производная ошибки

На рис. 13 представлены переходные характеристики сигналов управления при различной реализации ПИД-регулятора.

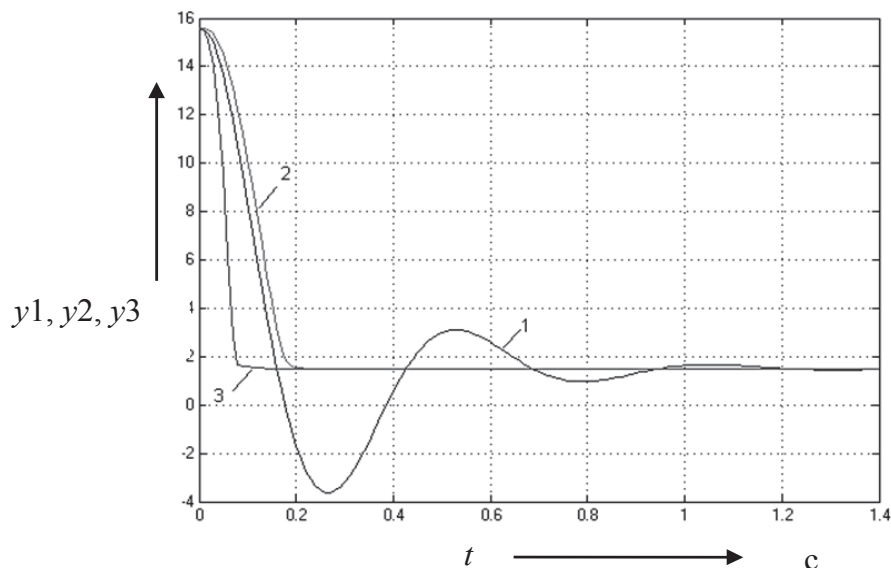


Рис. 13. Графики переходных характеристик сигналов управления исследуемых систем:
1 – переходная функция в системе с классическим ПИД-регулятором;
2 – переходная функция в системе с НЛР; 3 – переходная функция в системе с МНЛР

По результатам моделирования (см. рис. 13) можно сделать выводы как о заметном улучшении динамики системы, так и о значительном сокращении времени переходных процессов в системах, построенных с использованием принципов нечёткой логики. Кроме того, многокаскадный ПИД-регулятор обладает ярко выраженными адаптивными свойствами, позволяет интеллектуально совмещать различные настройки системы управления, например, на симметричный и модульный оптимумы, т.е. позволяет решать многокритериальную задачу регулирования сложного технологического объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.
2. Соловьев, В. А. Применение нечёткой логики в устройствах регулирования энергетических объектов / В. А. Соловьев, А. Г. Владыко, В. С. Легенкин // Электроэнергетика и энергосберегающие технологии: межвузовский сб. науч. тр. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1998. – С. 125-133.
3. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 280 с.
4. Черный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, А. А. Гусаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 24-30.



Ким К. К., Шпилев М. А.
K. K. Kim, M. A. Shpilev

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАЗГРУЗКИ СМЁРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ПОЛУВАГОНОВ

ELECTROHYDROPULSIVE EXPRESS METHOD OF UNLOAD OF FROZEN COIL FROM THE GONDOLAS

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9; тел. 8(812)7688142. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Kim Konstantin Konstantinovich – member of Russian Academy of electrical engineering, doctor of engineering science, professor, Head of Department TOE of Petersburg State Transport University (Russia); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9; tel. 8(812)7688142. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Шпилев Михаил Анатольевич – аспирант кафедры ТОЭ Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9; тел. 8(812)7688142. E-mail: ktoc@pgups.edu.

Shpilev Michael Anatolevich – postgraduate of Department TOE of Petersburg State Transport University (Russia); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9; tel. 8(812)7688142. E-mail: ktoc@pgups.edu.

Аннотация. Описывается экспресс-метод разгрузки смёрзшегося угля из полувагонов, основанный на электрогидроимпульсном эффекте. Рассматривается вопрос оптимизации количества и расположения электровзрывных патронов в угольном массиве. Показывается сохранность конструкции полувагона при данном методе разгрузки.

Summary. The express method of unload of the frozen coal from the gondola cars based on the electrohydropulsive effect is presented. We consider the problem of optimisation of the quantity and a locating of the electroexplosive cartridge s in a coal body. We show the nondestructive of the gondola construction at this method of unload.

Ключевые слова: смёрзшийся уголь, полувагон, разгрузка, электрогидроимпульсный эффект.

Key words: frozen coal, gondola, unload, electrohydropulsive effect.

УДК 537.427.6

Примерно 80 % балансовых запасов энергетического угля в России сосредоточено в районах Западной и Восточной Сибири. Более 50 % экспортного угля покидает пределы страны через морские торговые порты.

Большинство российских угольных месторождений расположено далеко от выходов к морю. Расстояние до ближайших портов составляет порядка 3,5-4,5 тыс. км.

Для транспортировки угля применяются полувагоны. Отсутствие крыши у полувагона обеспечивает удобство погрузки и выгрузки грузов, однако не защищает от атмосферных осадков. К тому же ископаемый уголь содержит некоторое количество влаги. Обычно рабочая влага каменных углей составляет 6-18 %. При транспортировке в зимний период на большие расстояния уголь смерзается. Применяемых мер по противодействию смерзанию в большинстве случаев оказывается недостаточно.

Традиционно для выгрузки смёрзшегося угля из полувагона использовались грейферные краны, но в последние годы из-за повышения интенсивности разгрузки многократно

Ким К. К., Шпилев М. А.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАЗГРУЗКИ СМЁРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ПОЛУВАГОНОВ

возросла повреждаемость полувагонов. Альтернативой грейферу на сегодняшний день является технология разгрузки смерзшегося угля «размораживающее устройство – вагоноопрокидыватель». Эта технология требует значительных временных и материальных затрат, в результате чего производительность морских торговых портов сокращается в разы, возникают заторы на железнодорожных подъездах.

Одним из возможных путей решения проблемы является внедрение электрогидроимпульсного метода восстановления сыпучести смерзшегося угля в полувагоне. Здесь используется энергия ударных волн, возникающих в результате электрического разряда в жидкости.

Технология процесса разрыхления довольно проста. В угольном массиве сверлятся вертикальные шпуровые скважины, в которые помещаются системы из концентрических электродов, заканчивающихся одноразовыми электровзрывными патронами. Патрон представляет собой герметичный цилиндрический резервуар, заполненный незамерзающей жидкостью и содержащий электровзрывную проволочку, электрически соединённую с электродами. При подаче импульса тока от генератора импульсных токов проволочка моментально испаряется, инициируя электрический разряд в жидкости с последующим возникновением ударных волн, распространяющихся в жидкости, а затем в угольном массиве.

Авторами был разработан разгрузочный комплекс (см. рис. 1) с использованием данного метода. Комплекс состоит из вагоноопрокидывателя 1, в который помещается полувагон 2. В верхней части комплекса располагается бурильно-разрядная установка 3 и генератор импульсных токов 4 [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8].

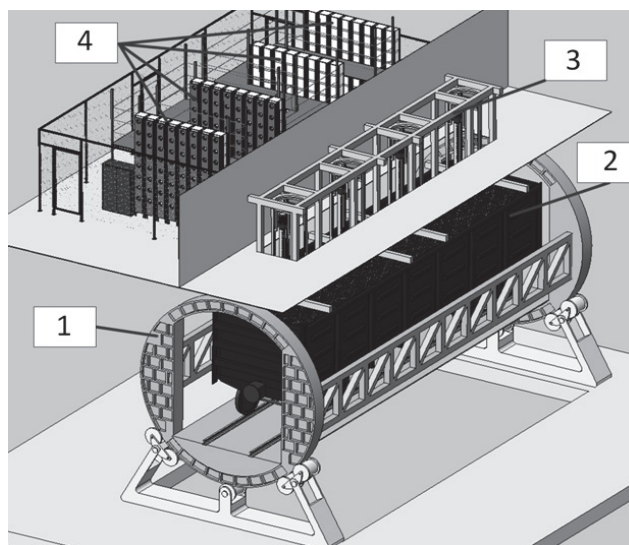


Рис. 1. Разгрузочный комплекс

На практике разгрузочный процесс состоит из следующих этапов:

1. Подача толкателем по подъездным путям полувагона на вагоноопрокидыватель (1-2 мин).
2. Закрепление верхней обвязки кузова полувагона захватами вагоноопрокидывателя (1-3 мин). Установка на электродах одноразовых патронов (операция происходит параллельно с пп. 1 и 2).
3. Опускание бурильно-разрядной установки к полувагону (1 мин).
4. Установка буров в рабочее положение и синхронное бурение вертикальных шпуров (3 мин).
5. Подъём буров и контроль качества пробуренных шпуров (1 мин).
6. Отвод буров и перевод электродов в рабочее положение, опускание электродов в пробуренные шпуровые скважины (2 мин).

7. Заряд генераторов импульсных токов и синхронный разряд всех электродных систем (1 мин).
8. Контроль снятия высокого напряжения и подъём электродов (1 мин).
9. Отвод бурильно-разрядной установки от вагоноопрокидывателя (1-2 мин).
10. Переворот полувагона (2-4 мин).

Таким образом, на разгрузку одного полувагона требуется 14-20 минут. Разгрузочная способность комплекса составит 70-100 полувагонов в сутки.

Выбор оптимального количества патронов

Обоснованный выбор оптимального количества патронов является определяющим при разработке конструкции разгрузочного комплекса. С одной стороны, стоит задача восстановления сыпучести смёрзшегося угля в пределах полувагона, с другой – задача сокращения стоимости оборудования. Для создания каждого разряда в каждой электродной системе требуется отдельный генератор импульсных токов, стоимость которого складывается из капитальных затрат (стоимость конденсаторов, зарядного устройства, системы управляемых коммутаторов, системы управления, шин подсоединения) и эксплуатационных затрат (стоимость одноразовых электрогидроимпульсных патронов и трудозатрат на обслуживание установки). Кроме того, на конструкцию генератора импульсных токов накладываются определённые требования по электробезопасности и ремонтпригодности в случае выхода из строя вышеуказанных элементов. Поэтому увеличение количества электродных систем приведёт к ухудшению стоимостных и массогабаритных показателей. Последние могут оказаться решающими, например, в случае модернизации существующих разгрузочных комплексов, базирующихся на технологии «разогревающее устройство – вагоноопрокидыватель», т.к. установка по восстановлению сыпучести угля располагается непосредственно над вагоноопрокидывателем.

Необходимо также учитывать, что при относительно близком расстоянии между патронами разрушение зоны вокруг одного патрона может оказать демпфирующее воздействие на ударную волну соседнего. Поэтому необходимо обеспечить синхронность разрядов, что затруднительно при большом количестве патронов.

Анализ напряжённо-деформированного состояния угольного монолита при воздействии ударных волн показал, что наиболее оптимальным является вариант расположения в полувагоне (длина $\approx 12,5$ м, ширина ≈ 3 м, высота $\approx 2,4$ м) четырёх электродных систем на его центральной оси. Уровень заглубления патронов равен половине высоты тары полувагона, что соответствует 1,2 м.

Расстояние между патронами равно удвоенному расстоянию от разрядной полости до торцевой стенки (1,56 м) полувагона и составляет 3,12 м.

На рис. 2 представлена схема расположения патронов в толще смёрзшегося массива.

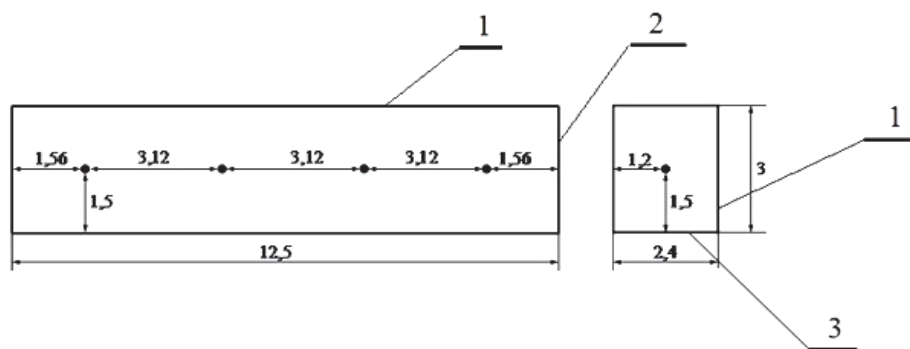


Рис. 2. Схема расположения патронов: 1 – боковые стенки, 2 – торцевые стенки, 3 – днище

Ким К. К., Шпилев М. А.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАЗГРУЗКИ СМЁРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ПОЛУВАГОНОВ

Расчёты производились в COMSOL Multiphysics 4.2. Граничные условия: все грани параллелепипеда зафиксированы, стенки – свободны. Расчётная модель содержит 21 136 элементов тетраэдральной формы.

На рис. 3 представлены результаты моделирования – максимальное значение тензора напряжений на поверхности массива, а также в сечениях главной оси.

Тёмным оттенком отмечены области, в которых тензор напряжений равен или превышает 2 МПа. В соответствии с критерием прочности Губера-Мизеса около 96 % монолита подверглось разрушению.

Можно заключить, что данный вариант позволяет обеспечить практически равноудалённое расположение патронов от стенок полувагона и обеспечить равномерное распределение механических напряжений в толще смёрзшегося угольного массива и у стенок полувагона.

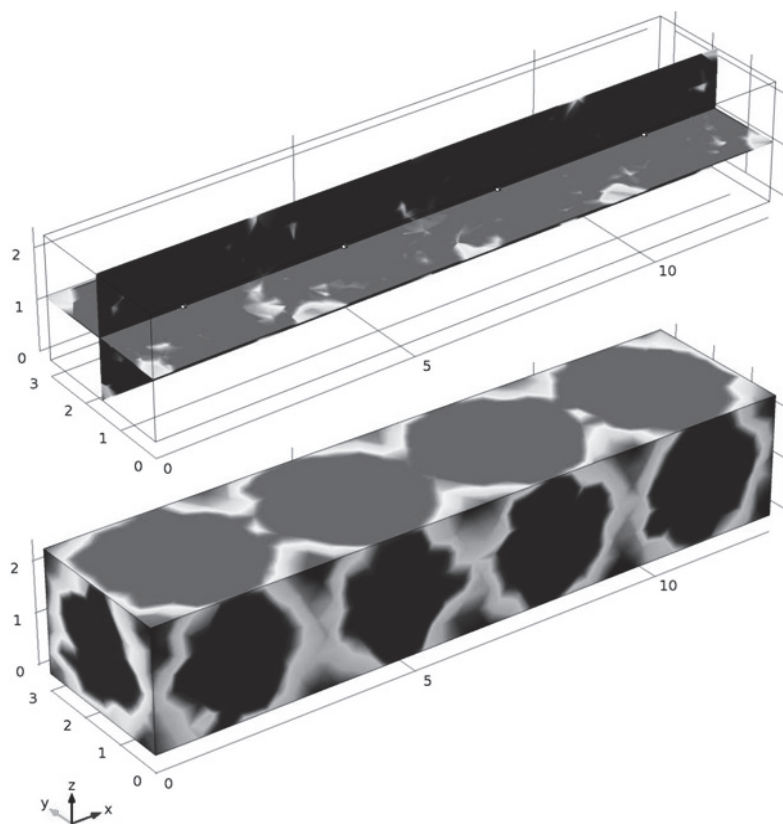


Рис. 3. Максимальное значение эквивалентных напряжений в массиве

Влияние работы электрогидроимпульсной установки на элементы конструкции полувагона

Для оценки прочности кузова полувагона при воздействии ударной взрывной волны выбран универсальный полувагон модели 12-1293 производства ОАО «Рухиммаш».

Внутренние размеры кузова: длина в свету – 12 768 мм; ширина в свету по верхним обвязкам – 2928 мм; высота – 2300 мм.

Боковая стенка вагона состоит из верхней и нижней обвязок, угловых и боковых стоек и металлической обшивки из листов гнутого профиля с продольно расположенными обращёнными наружу вагона гофрами, толщина листов обшивки составляет 4 мм. Нижняя обвязка выполнена из прокатного уголка, верхняя – из трубы. Стойки боковой стены выполнены из омегаобразного профиля. В консольной части боковая стена усилена листом толщиной 8 мм.

Рама кузова имеет хребтовую балку, сваренную из двух зетов и двутавра, две шкворневые балки коробчатого замкнутого сечения, сваренные из двух вертикальных и двух гори-

зонтальных листов, лобовые балки коробчатого замкнутого сечения и промежуточные балки двутаврового профиля, сваренные из вертикального листа и двух горизонтальных поясов.

Торцевая стена полувагона состоит из верхней обвязки, трёх поперечных поясов, выполненных из прокатной трубы и двух стоек, соединяющих нижний пояс торцевой стены с лобовым листом.

Главное требование к полувагону при воздействии ударной взрывной волны – не допустить появления остаточных деформаций в кузове вагона, поэтому допускаемые напряжения приняты равными пределу текучести материала $\sigma_T = 345$ МПа. Для стали 09Г2С ГОСТ 19281-89 модуль упругости $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_{ст} = 0,3$. Плотность стали $\rho_{ст} = 7850$ кг/м³.

Расчёт производился с использованием расчётного пакета ANSYS версии 12.0. Для моделирования груза использовались объёмные элементы типа SOLID186. Используемый конечный элемент имеет квадратичные функции формы и три степени свободы в каждом узле, перемещения вдоль осей x, y, z .

Для моделирования обшивки полувагона использовались оболочечные конечные элементы типа SHELL93. Используемый конечный элемент имеет квадратичные функции формы, 8 узлов и шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения вдоль осей x, y, z и повороты вокруг этих осей.

Для моделирования стоек, обвязок, продольных и поперечных элементов рамы полувагона использовались балочные конечные элементы типа BEAM189, основанные на теории балки Тимошенко. Используемый балочный конечный элемент имеет квадратичные функции формы и шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения вдоль осей x, y, z и повороты вокруг этих осей.

Конечно-элементная модель включает 89 627 конечных элементов и 125 763 узла, из них 85 175 объёмных элементов (124 956 узлов), 4011 оболочечный элемент (12 239 узлов), 441 балочный элемент (1318 узлов). Общий вид разработанной конечно-элементной модели представлен на рис. 4. В качестве кинематических граничных условий принимались ограничение вертикальных перемещений в шкворневом узле вагона, в месте опирания кузова на подпятник тележки и условия симметрии продольных и поперечных перемещений.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

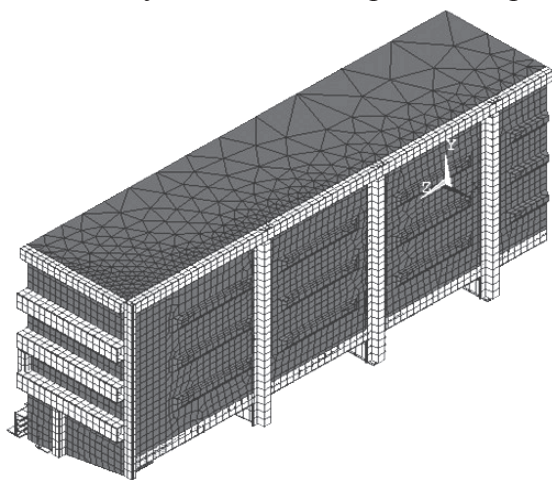


Рис. 4. Конечно-элементная модель четверти кузова с углём

Из рис. 5 видно, что наибольшие напряжения возникают в хребтовой балке, непосредственно под разрядными полостями, что объясняется относительно малым расстоянием данного элемента конструкции от патронов. Максимальные напряжения в указанных областях составили порядка 42 МПа (на рисунке не показаны). Максимальные напряжения в стойках боковых стенок не превышают 6,5 МПа. Напряжения верхней обвязки превышают ожидаемые и составляют не более 12 МПа. Столь высокий уровень напряжений связан с возникновением изгибающего момента, т.к. верхняя обвязка не зафиксирована. Максимальные напряжения в обшивке полувагона (на рисунке не показаны) составили не более 6,5 МПа.

Заключение

1. Электрогидроимпульсный экспресс-метод разгрузки смёрзшегося угля из полувагонов позволяет создать механическое напряжение 2 МПа в угольном массиве, что обеспечивает разрыхление около 96 % последнего.

Ким К. К., Шпилев М. А.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАЗГРУЗКИ СМЁРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ПОЛУВАГОНОВ

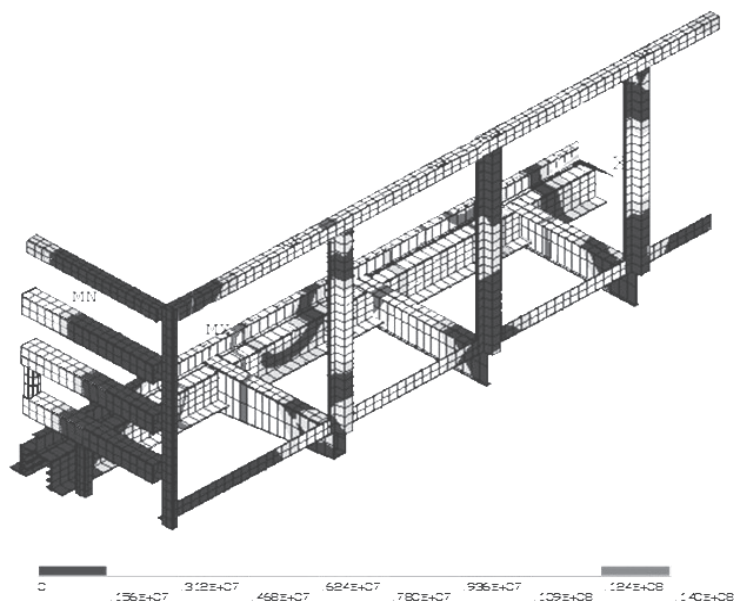


Рис. 5. Максимальное значение эквивалентных напряжений в каркасе полувагона

2. При воздействии ударных волн системы из четырёх электрогидроимпульсных патронов в элементах конструкции полувагона не возникает напряжений, превышающих допустимый уровень $\sigma_T = 345$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. К вопросу об эффективной технологии разгрузки смёрзшегося угля / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 1 (38). – С. 66-67.
2. Kim, K. K. Electrohydraulic complex for unloading coal from gondola cars / К. К. Kim, М. А. Spilev // Symposium Proceeding 20th International Symposium EURO-Zel 2012, Zilina, Slovak Republic, 2012. – P. 227-229.
3. Kim, K. K. On the Efficient Unloading Technology for Frozen Coal / К. К. Kim, М. А. Spilev // Journal «Innovations and Technology News». Latvia. – 2012. – № 1.
4. Ким, К. К. Рыхление смёрзшегося угля электрогидравлическим методом / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 48-56.
5. Ким, К. К. Анализ пространственно-временной структуры напряжённого состояния смёрзшегося угля при воздействии квазиточечных импульсных источников нагружения / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Электроснабжение и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 4. – С. 12-18.
6. Ким, К. К. Процессы волнового нагружения упругой среды источниками давления на основе электрогидравлического эффекта / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Импульсные процессы в механике сплошных сред: материалы X Междунар. науч. конф., Николаев, Украина, 19-22 авг. 2013 г. – Николаев: ИИПТ, 2013. – С. 186-189.
7. Ким, К. К. Новая электрогидроимпульсная установка для разрыхления смёрзшегося угля / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Физико-математические проблемы создания новой техники: тезисы междунар. науч. конф., Москва, 17-19 нояб. 2014 г. – М.: МГТУ, 2014. – С. 96-97.
8. Ким, К. К. Электрогидроимпульсный комплекс для разгрузки смёрзшегося угля из полувагонов / К. К. Ким, М. А. Шпилёв // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 206-212.
9. Шпилёв, М. А. Теоретическое обоснование влияния работы электрогидроимпульсной установки восстановления сыпучести смёрзшегося угля на элементы конструкции полувагона / М. А. Шпилёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 46-52.



Зайков В. И., Крупский М. Р.
V. I. Zaykov, M. R. Krupskiy

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ
НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВИБРОМЕТРА HSV2000**

**FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE METHOD LASER VIBROMETER USING
HIGH-SPEED VIBROMETRII HSV2000**

Зайков Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление недвижимостью и кадастры» Комсомольского-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: valerii_zaikov@mail.ru.

Valery I. Zajkov – PhD in Engineering, Associate Profctssor of depatment property Manegment of real estate and cadastres Komsomolsk-on-Amur State Technical Universite (Russia). E-mail: valerii_zaikov@mail.ru.

Крупский Максим Романович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: max_krupskiy@rambler.ru.

Maksim R. Krupskiy – graduate of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: max_krupskiy@rambler.ru.

Аннотация. Выполнен анализ эффективности аппаратного обеспечения метода лазерной виброметрии. Представлены результаты теоретического обоснования, рассмотрены схемные решения, обеспечивающие оптимальное функционирование лазерного виброметра в различных режимах эксплуатации.

Summary. The analysis of the efficiency of the hardware method of laser vibrometry. Presents the results of a theoretical substantiation and considered schematic solutions to ensure optimal functioning of the laser vibrometer in various operating modes.

Ключевые слова: лазерная виброметрия, гетеродинный интерферометр, доплеровский эффект, квадратичное фотодетектирование.

Key words: laser vibrometry, heterodyne interferometer, Doppler effect, quadratic photodetection.

УДК 535.8:621.373.8

Постановка задачи

Современные достижения в области оптико-электронных методов неразрушающего контроля и диагностики в значительной степени связаны с развитием лазерной интерферометрии и виброметрии. Значительный рост научных публикаций по этой тематике, а также высокий уровень аппаратного обеспечения свидетельствуют о существенном научно-техническом прогрессе в данной области, что также предполагает широкое внедрение этих методов в машиностроительном производстве.

Эффективность применения данной технологии в первую очередь определяется высокой чувствительностью и точностью метода измерения, а также реализацией принципа дистанционного и бесконтактного контроля исследуемых объектов [1]. К настоящему времени выполнено значительное количество разработок в этой области, что вызывает необходимость их классификации. В качестве классификационных признаков обычно используют:

- характеристики чувствительности регистратора, формирующего поток информационных данных об объекте исследования;

Зайков В. И., Крупский М. Р.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВИБРОМЕТРА HSV2000

- параметры лазерного излучения (интенсивность, частота, когерентность), подлежащие измерению;

- характер функциональной зависимости, определяющей связь параметров лазерного излучения с частотой и скоростью перемещения объекта при вибрации.

Так, в частности, регистрация изменения интенсивности отражённого лазерного пучка позволяет реализовать фотомодуляционный способ получения необходимых вибрационных характеристик. Известно также, что трансформация частоты лазерного излучения (эффект Доплера) при отражении от движущегося объекта позволяет получить информацию о скорости перемещения. Суперпозиция опорного и сигнального когерентных лазерных пучков позволяет выделить информационный сигнал путём регистрации параметров интерференционного поля. Кроме того, при разработке современных лазерно-оптических систем, предназначенных для исследования параметров вибрации, необходимо использовать эффективные и быстродействующие методы обработки полученной информации, реализуемые на базе вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением.

Сфера использования метода лазерно-оптической виброметрии в технологии производства контрольно-измерительных работ достаточно широка и разнообразна. Различные схемные и конструктивные решения когерентных лазерно-оптических систем находят своё применение при диагностике в автомобильной промышленности, производстве и эксплуатации объектов крупногабаритного машиностроения, авиа- и судостроении, прокладке оптоволоконных линий связи и т.п.

В соответствии с выбранной функциональной структурой метода лазерной виброметрии формируется необходимый комплект устройств для обеспечения измерений параметров вибрации.

В процессе измерения могут фиксироваться различные технические характеристики объекта исследования:

- параметры циклического движения объектов в заданном направлении при воздействии возмущающих факторов (температуры, давления и т.д.). В этом случае целью измерения является как определение закона движения, так и получение необходимых параметров процесса вибрации;

- измерение параметров механических колебаний при проведении виброиспытаний. Цель измерений заключается в получении результатов, на основании которых можно сделать вывод о работоспособности в заданном режиме эксплуатации;

- измерение параметров механических колебаний при тестировании виброизмерительной аппаратуры;

- измерение параметров ударных процессов для последующего расчёта деформаций.

Особую актуальность приобретает технология применения лазерно-оптических систем с фазовой модуляцией в виброметрии измерения угловых колебаний, исследовании неравномерности скорости движения узлов и деталей машин, контроле профиля поверхности и в системах активного контроля.

Теоретическое обоснование и функциональная структура метода лазерной виброметрии

В современной вибродиагностике наиболее широкое применение получила лазерно-оптическая система регистрации сдвига частоты излучения при отражении сигнального пучка от объекта контроля в процессе его движения по заданному направлению.

Формирование оптической схемы измерения в этом случае должно быть ориентировано на создание в рабочей зоне опорного и сигнального лазерного пучка с последующей их суперпозицией в плоскости регистрации. При этом модуляция частоты сигнального лазерного пучка обеспечивается при отражении от объекта контроля с последующей регистрацией

изменения параметров интерференционного поля. Информационный канал реализуется на основе фотодетекторов балансного типа при обработке электрического сигнала.

Скорость и амплитуда вибрирующего объекта создают частотную или фазовую модуляцию вследствие доплеровского эффекта. Таким образом, отражённый луч подвергается небольшому сдвигу частоты, который называется доплеровской частотой. Доплеровская частота является функцией компоненты скорости в направлении объекта согласно уравнению

$$f_D = 2 \frac{v}{\lambda},$$

где λ – длина волны лазерного излучения.

В свою очередь, с помощью ячейки Брэгга в опорном луче создаётся сдвиг частоты оптического диапазона (70 МГц). После совмещения опорного и измеренного сигналов на фотодетекторе формируется электрический сигнал с мгновенной частотой:

$$f_c(t) = f_B + f_D(t) = f_B + 2 \frac{v(t)}{\lambda}. \quad (1)$$

Соотношение (1) характеризует сигнал несущей частоты f_B модулированной доплеровской частотой $f_D(t)$ с соответствующим знаком. Сигнал скорости можно декодировать путём частотной демодуляции [2; 3].

В общем виде конструкция лазерного виброметра состоит из источника лазерного излучения, оптической системы, электронного модуля и ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением (см. рис. 1).

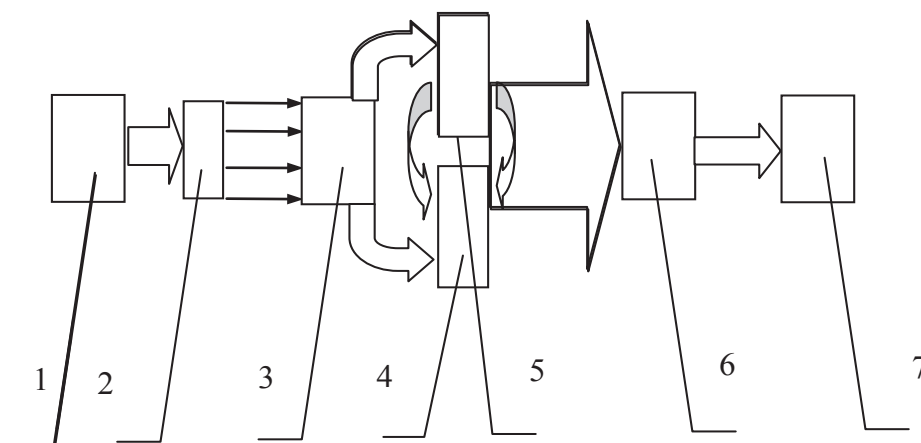


Рис. 1. Функциональная схема метода лазерной виброметрии:
1 – лазерно-оптический блок; 2 – фотоприёмники; 3 – блок усилителей;
4 – демодулятор частотный; 5 – демодулятор аналитического сигнала;
6 – блок управления; 7 – персональный компьютер

Формирование лазерно-оптической системы осуществляется в соответствии с известной схемой интерферометра Майкельсона, включающей источник когерентного лазерного излучения. Блок оптических элементов состоит из коллиматора с приёмо-передающей функцией; оптической системы суперпозиции сигнального и опорного лазерного пучка; оптического элемента с функцией «делителя-смесителя» для формирования и пространственного совмещения опорного и сигнального лазерных пучков [4].

Зайков В. И., Крупский М. Р.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВИБРОМЕТРА HSV2000

Специфика эксплуатации электронного модуля в составе лазерного виброметра состоит в необходимости регистрации достаточно слабого по интенсивности лазерного пучка, несущего информацию об объекте контроля. В данном случае электронный модуль должен обеспечить работу системы в режиме анализатора спектра распределения интенсивности в поле диффузно отражённого лазерного (сигнального) пучка и опорного лазерного пучка.

В этом режиме регистрируются численные значения резонансных частот объекта исследования и измеряются уровни сигналов для малых значений виброскорости при наличии сопутствующих шумов различного характера. При сравнении сигналов во временной и частотной областях выявляется неоспоримое преимущество спектрального подхода к измерению скорости вибрации. Так, например, если уменьшить амплитуду на два порядка, то однозначное измерение амплитуды сигнала во временной области будет проблематичным из-за достаточно сильных шумов. В спектральной области амплитуда регистрируется с гораздо более высокой точностью, что позволяет осуществлять измерение виброскорости объекта на минимально возможном уровне.

Функциональная схема электронного модуля выполнена на базе фотодетекторов и обеспечивает преобразование сигнала изменения частоты излучения в электрический сигнал. Последующая обработка электрического сигнала требует усиления в системе блока усилителей с автоматической регулировкой. Для регистрации параметров вибрации объекта исследования (скорость, амплитуда, частота) требуется соответствующая система демодуляции преобразованных электрических сигналов [5].

Схемное решение данной системы зависит от требуемой степени вариативности того параметра вибрации, который подлежит анализу. В этом случае могут быть использованы как частотные демодуляторы, так и модуляторы аналитического сигнала, созданные на базе аналого-цифровых преобразователей с подключением к блоку управления. На выходе демодуляторов аналоговый сигнал, характеризующий тот или иной параметр вибрации, поступает на вход блока управления, состоящего из сигнального и управляющего микропроцессоров. Структурная схема блока управления в подобном исполнении позволяет осуществлять цифровую обработку и анализ вибрационных сигналов. Полученные результаты могут быть представлены в виде спектрограмм или осциллограмм с возможностью отображения на мониторе ПЭВМ. Подключение ПЭВМ осуществляется по традиционной схеме с использованием соответствующих портов блока управления. В этом случае процесс измерения параметров сигнала осуществляется путём управления подвижным маркером на экране монитора. Исполнение блока управления с такой схемой взаимодействия между сигнальным и управляющим микропроцессорами позволяет эффективно реализовать следующие режимы эксплуатации: режимы осциллографа, анализатора спектра, а также связи с внешними устройствами.

Оценка эффективности системы лазерной виброметрии на базе комплекса HSV2000

В состав базовой комплектации высокоскоростного лазерного виброметра HSV-2000 входят следующие устройства:

- контроллер HSV-2001/2002;
- лазерный модуль HSV-800;
- компактная сенсорная головка HSV-700.

Конструкция лазерного модуля представляет собой интерферометр Майкельсона с когерентным и монохроматическим источником излучения в видимом диапазоне. Оптическая система сенсорной головки телескопического типа реализована в двух вариантах исполнения – с фиксированным фокусным расстоянием и регулируемым фокусным расстоянием. Оптическая система сенсорной головки с фиксированным фокусным расстоянием позволяет обеспечить достаточную глубину резкости для регистрации колебаний с амплитудой в

несколько десятков миллиметров. В свою очередь, сенсорная головка с регулируемым фокусным расстоянием обеспечивает эффективную работу лазерного виброметра дистанционно, на достаточно большом удалении от объекта исследования.

Контроллер HSV-2001 лазерного виброметра оснащён регистратором перемещений на шесть диапазонов с разрешением 0,32 мкм и максимальным измеряемым перемещением ± 82 мм. Для регистрации скорости перемещения объекта организуется подключение самостоятельного декодера с частотой колебаний до 50 кГц и фиксированным масштабным коэффициентом, равным 5 м/с/В. Для реализации дифференциального режима измерения работа высокоскоростного лазерного виброметра организуется по двухканальной схеме с подключением двух лазерных модулей.

В этом случае контроллер высокоскоростного лазерного виброметра обеспечивает отдельный вывод сигнала по каналам А, В и дифференциальному каналу А – В с возможностью регистрации величины заданного интервала перемещения как по каналу А, так и по каналу А – В.

Использование поворотного переключателя, установленного на лицевой панели контроллера, позволяет осуществлять выбор заданного выходного сигнала скорости и перемещения.

Контроль степени интенсивности сигнального лазерного пучка, отражённого от объекта контроля, осуществляется по встроенным экранам на лицевой панели контроллера и сенсорной головки. Изменение уровня сигнала соответствует количеству активных секторов на экранах регистрации.

Существенное расширение функциональных возможностей высокоскоростного лазерного виброметра обеспечивается при подключении к аналоговым выходным каналам контроллера БПФ-анализатора, цифрового осциллографа или аналогового цифрового преобразователя, что позволяет осуществлять эффективную регистрацию, обработку и сохранение результатов измерения параметров вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королёв, А. М. Оптические модуляционные методы измерения параметров механических колебаний / А. М. Королёв // Приборостроение и автоматический контроль. Лазерные устройства и их применение. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 179-197.
2. Ярославский, Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии / Л. П. Ярославский. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
3. Протопопов, В. В. Лазерное гетеродинирование / В. В. Протопопов, Н. Д. Устинов; под ред. Н. Д. Устинова. – М.: Наука, 1985. – 288 с.
4. Захарченко, В. Д. Оценка параметров лазерного доплеровского виброметра / В. Д. Захарченко, А. А. Брыжин, А. Ф. Васильев // Измерительная техника. – 1998. – № 12. – С. 80-82.
5. Зайков, В. И. Модуляция интенсивности излучения полупроводникового лазера серии DLDPМ12-625-25 / В. И. Зайков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 18-21.

Шептунов С. А., Карлова Т. В., Кузнецова Н. М.
S. A. Sheptunov, T. V. Karlova, N. M. Kuznetsova

**КРИПТОАНАЛИЗ СООБЩЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ
ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ**

**MESSAGE CRYPTANALYSIS IN AUTOMATED DATA LEAK PREVENTION SYSTEMS
WITH APPLICATION OF GRAPH THEORY**

Шептунов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, директор Института конструкторско-технологической информатики РАН (Россия, Москва); тел. 8(499)9785715. E-mail: ship@ikti.ru.

Sheptunov Sergey Aleksandrovich – Doctor of technical science, Professor, director, Institute of Design-Technological Informatics of RAS (Russia, Moscow); tel. 8(499)9785715. E-mail: ship@ikti.ru.

Карлова Татьяна Владимировна – доктор социологических наук, кандидат технических наук, профессор, ведущий старший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН (Россия, Москва); тел. 8(499)9789962, 8(903)7769078. E-mail: karlova-t@yandex.ru.

Karlova Tatyana Vladimirovna – Doctor of sociological Science, candidate of technical science, Professor, Chief Senior staff scientist, Institute of Design-Technological Informatics of RAS (Russia, Moscow); tel. 8(499)9789962, 8(903)7769078. E-mail: karlova-t@yandex.ru.

Кузнецова Наталия Михайловна – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления», ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (Россия, Москва); тел. 8(499)9729437, 8(903)5818015. E-mail: knm87@mail.ru.

Kuznetsova Natalia Michaelovna – Candidate of technical science, lecturer, Automated Control Systems and Information Processing Department, Moscow State University of Technology STANKIN (Russia, Moscow); tel. 8(499)9729437, 8(903)5818015. E-mail: knm87@mail.ru.

Аннотация. С целью повышения параметров информационной безопасности современные промышленные предприятия всё чаще используют автоматизированные системы предотвращения утечек информации по каналам связи. Однако на сегодняшний день не существует такой системы, которая позволяла бы детектировать угрозу при условии, что злоумышленник воспользуется методами шифрования информации перед её передачей. Статья посвящена криптоаналитическому методу обработки текстов с применением теории графов, который позволит решить поставленную задачу.

Summary. To improve information security parameters modern industries implement of automated data leak prevention systems. However these technologies cannot detect threads when malefactors apply ciphering before information communication. The article is devoted to cryptanalytic information processing method, which is to solve described problem.

Ключевые слова: информационная безопасность, криптография, автоматизация.

Key words: information security, cryptography, automation.

УДК 004.056.55

Для борьбы с угрозами информационной безопасности, связанными с атаками внутренних злоумышленников, применяются системы класса DLP (Data Leak Prevention) – предотвращение утечек информации по каналам связи. В качестве каналов связи рассматриваются все «точки соприкосновения» информационной системы предприятия с внешней информационной средой:

- порты выхода в Интернет;
- USB-порты и накопители данных (процесс записи);
- электронная почта;
- принтеры и факсы и т.д. [1].

Системы класса DLP осуществляют контроль над «точками соприкосновения» (выходами из основной информационной системы) с целью предотвращения передачи секретной информации [2]. Внутренний злоумышленник может передавать конфиденциальную информацию по каналам связи в зашифрованном виде. Для детектирования подобной угрозы следует применять методы криптоанализа.

На сегодняшний день существует несколько методов дешифрования. Самым простым методом с точки зрения программной реализации является метод «грубой силы», при котором осуществляется перебор всех возможных вариантов [3; 4]. Однако применение данного метода требует наличия больших вычислительных ресурсов.

Создание графа как базы знаний языка

В статье [3] предлагается оптимизация метода простого перебора путём применения модуля кластеризации текста и использования механизма «смысловых центров».

Также данный криптоаналитический метод можно оптимизировать путём применения теории графов. В качестве вершин графа выступают смысловые центры – наиболее часто употребляемые слова (словосочетания), в качестве рёбер – связи слов. Рёбра графа являются нагруженными, вершины обладают соответствующими степенями. Нагруженность ребра характеризует связь смысловых единиц, степень вершины – «вес» смысловой единицы – частоту употребления данного слова или словосочетания. Согласно рис. 1, формирование данного графа происходит за счёт анализа текстовой информации в отдельном модуле.

Как показано на рис. 1, для построения графа модуль анализа текстов должен проводить расчёт частоты повторений слов (словосочетаний), а также проводить расчёт их связей. Расчёт частоты повторения и расчёт связей ведётся в параллельном режиме с постоянным обменом информацией. Итогом работы модуля анализа текстов должен стать граф, представляющий собой модель «смысловой» сети языка.

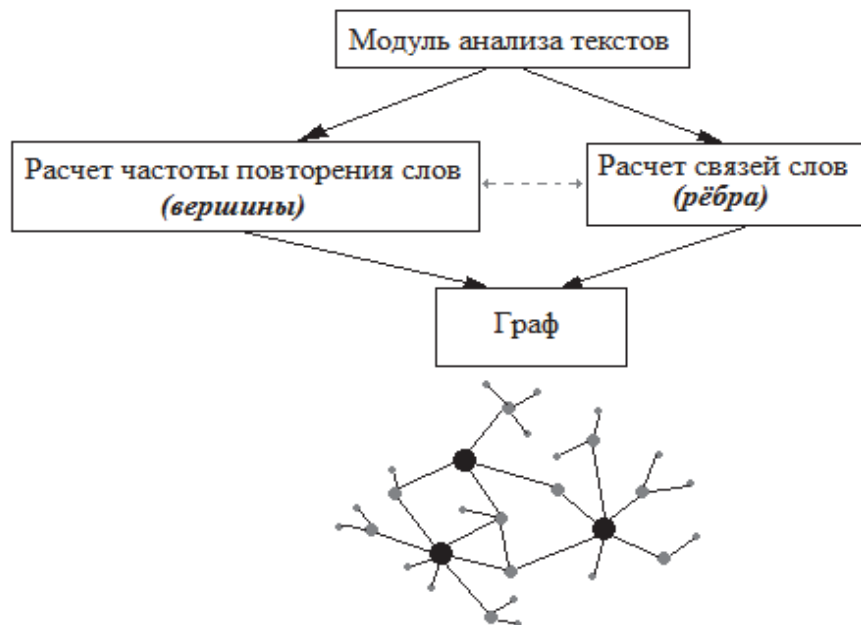
Принцип модификации графа с точки зрения накопления базы знаний языка

Работа модуля осуществляется автономно от основной информационной системы. Граф постепенно увеличивается и совершенствуется. Таким образом, формируется единая база знаний языка, основанная на смысловых связях.

Важно отметить, что строение графа будет зависеть от выбранного естественного языка. И если параметры вершин будут мало различаться, то характер их связей будет варьироваться. В любом случае построение подобного графа позволит анализировать структуру естественного языка в целом.

Модуль анализа текстов может работать в фоновом режиме и потреблять вычислительные ресурсы только тогда, когда они не требуются для основной информационной системы предприятия. Кроме того, анализ текстовой информации можно проводить не только «на территории» предприятия (используя вычислительные локальные мощности), но и производить расчёты согласно технологии виртуальных вычислений GRID [5], подразумевающей использование «сторонних» вычислительных ресурсов.

Для хранения информации о графе необходимо наличие больших объёмов постоянной памяти. Кроме того, при функционировании модуля требуемый объём будет увеличиваться. Однако оперативной памяти модуль анализа текстов будет требовать гораздо меньше, чем процессы основной информационной системы предприятия. Также объём занимаемой оперативной памяти может настраиваться администратором.



Условные обозначения:

→ – последовательность действий; <---> – информационная связь

Рис. 1. Формирование графа как фрагмента «смысловой» сети

Использование графа в качестве базы знаний языка в автоматизированной системе предотвращения утечки конфиденциальной информации

Согласно поставленной задаче, при анализе информационного контента автоматизированная система предотвращения утечек информации по каналам связи (АС ПУИКС) должна также осуществлять криптологический анализ всего зашифрованного трафика. Как отмечалось ранее, данную процедуру можно производить с помощью усовершенствованного метода «грубой силы». Суть метода состоит в переборе всех возможных вариантов.

Оптимизация метода заключается в постоянном уменьшении входного множества перебора с помощью применения описанного выше графа. На рис. 2 представлена схема уменьшения входного множества поиска (перебора).

Согласно рис. 2, выполняется следующее неравенство:

$$\Omega > \alpha > \beta > \xi,$$

где Ω , α , β , ξ – соответствующие множества поиска.

На рис. 3 представлен алгоритм работы усовершенствованного метода «грубой силы».

В начале работы метод «грубой силы» функционирует в своём обычном режиме. Как только находятся какие-либо закономерности («паттерны») в тексте, происходит обращение к графу как к базе знаний языка. В графе находятся соответствующие «вероятные паттерны» – похожие по параметрам вершины, окрестности вершин и их связи. Далее метод производит замену входного множества поиска на множество «вероятных паттернов».

При использовании усовершенствованного метода «грубой силы», основанного на дополнительном применении теории графов, повышается эффективность и скорость процесса криптоанализа.

Чем дольше работает модуль анализа текстов, тем больше граф (база знаний языка) модифицируется и «разрастается»: в нём появляются новые вершины, меняются степени вершин и характер связей. Процесс модификации графа может быть как непрерывным, так и

единовременным. Примером подобного характера обновлений могут служить программные комплексы – «антивирусы».

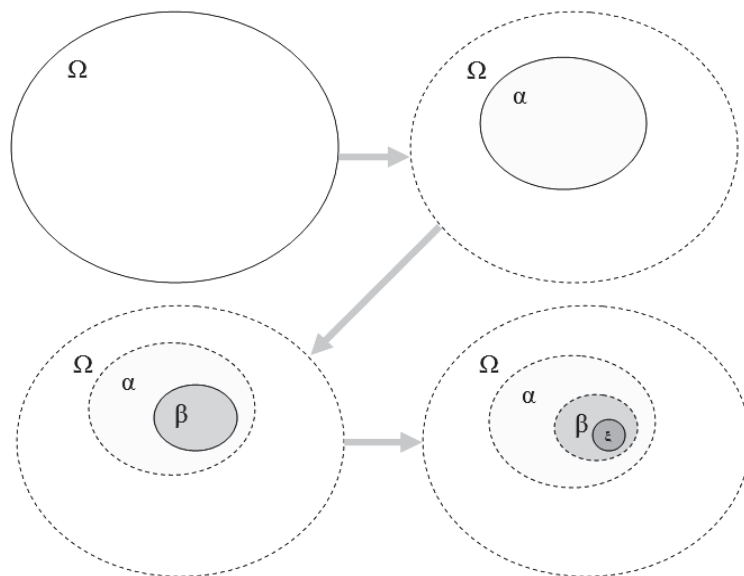


Рис. 2. Уменьшение входного множества поиска (перебора)

Также в качестве достоинства предложенного в статье метода необходимо отметить, что построение графа (формирование базы знаний языка) может выполняться в фоновом режиме. Кроме того, обновление графа может происходить периодически, а не постоянно – перебои со связью (с сетью Интернет) существенно не повлияют на построение графа в целом, т.к. модуль анализа текстов может находиться в режиме ожидания. Аналогична ситуация в случае недостатка вычислительных ресурсов для основной информационной системы предприятия – модуль анализа текстов, входящий в АС ПУИКС, переходит в состояние «сна».

Граф, представляющий базу знаний языка, не содержит конфиденциальной информации, поэтому его хранение можно организовать отдельно от основной информационной системы предприятия. Однако важно отметить, что для корректного функционирования усовершенствованного алгоритма «грубой силы» необходимо обеспечение доступности соединения с базой знаний языка.

Выводы

Описанным в статье механизмом можно воспользоваться при формировании баз знаний не только естественных, но и искусственных языков. База знаний искусственных языков также важна, т.к. зачастую внутренние злоумышленники передают за пределы информационной системы предприятия именно фрагменты программных кодов. Эффективность применения базы знаний искусственных языков выше ввиду того, что искусственные языки более формализованы по сравнению с естественными языками. Кроме того, подобные базы знаний требуют небольших объемов постоянной памяти.

Скорость работы усовершенствованного алгоритма «грубой силы» намного увеличивается, если происходит расшифровка текстов, написанных на искусственных языках (например, текстов, содержащих программный код).

Алгоритм криптоанализа использует граф, не обращая напрямую в глобальную сеть, т.е. связь основной информационной системы с сетью Интернет косвенная, поэтому применение модуля анализа текстов не снижает показателей информационной безопасности предприятия.

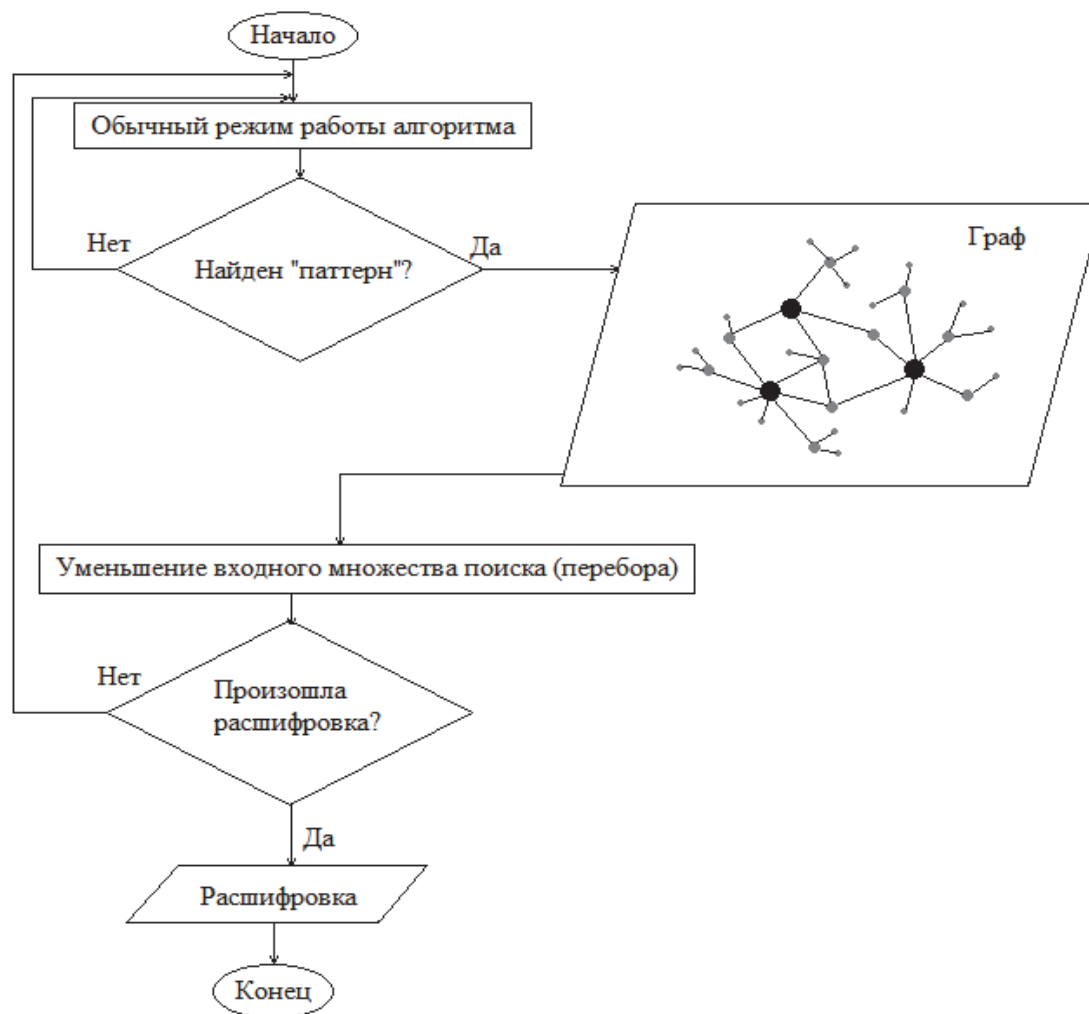


Рис. 3. Усовершенствованный алгоритм метода «грубой силы»

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова, Н. М. Классификация каналов утечки конфиденциальной информации на современном промышленном предприятии / Н. М. Кузнецова, Т. В. Карлова // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народнохозяйственных комплексов: сб. ст. IV Междунар. научно-практ. конф. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С. 82-85.
2. Кузнецова, Н. М. Контроль технических каналов утечки информации с помощью технологии Data Loss Prevention в автоматизированной системе разграничения доступа к конфиденциальной информации / Н. М. Кузнецова, Т. В. Карлова // Конкурентоспособность предприятий и организаций: сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С. 84-87.
3. Кузнецова, Н. М. Применение усовершенствованного криптоаналитического метода «грубой силы» в автоматизированной системе разграничения доступа к конфиденциальной информации / Н. М. Кузнецова, Т. В. Карлова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 4 (23). – С. 139-143.
4. Панасенко, С. Алгоритмы шифрования: специальный справ. / С. Панасенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 578 с.
5. Maozhen Li The GRID: Core Technologies / Li Maozhen, Mark Baker // John Wiley & Sons. – 2005. – 452 p.

Еренков О. Ю., Кравченко Е. Г., Верещагина А. С.
Oleg. U. Erenkov, Elena. G. Kravchenko, Alexandra. S. Vereshchagina

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ФТОРОПЛАСТА

THE STUDY OF PROCESS TURNING AT TEFLON WORK PIECES

Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология и биотехнология» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: erenkov@list.ru.

Mr. Erenkov Oleg Uryevich – professor of chemical technology at the Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: erenkov@list.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Ms. Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Верещагина Александра Сергеевна - кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa321@gmail.com.

Ms. Alexandra S. Vereshchagina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa321@gmail.com.

Аннотация. В данной работе представлены результаты экспериментальной проверки возможности проявления неустойчивости технологической системы при точении заготовок из фторопласта. Установлен характер взаимосвязи между режимом резания, видом предварительной подготовки заготовок и уровнем шероховатости обработанной точением поверхности. Экспериментально подтвержден факт существования таких режимов точения фторопласта, реализация которых приводит к переходу технологической системы СПИЗ в неустойчивое состояние, о чем свидетельствует резкое повышение шероховатости обработанной поверхности.

Summary. The results of experimental validity check of the hypothesis of non-linear dynamic systems instability at polymeric materials turning is considered in this paper. The character of interaction between cutting conditions, type of preliminary blanks treatment and roughness of treated surface are presented.

Ключевые слова: фторопласт, технологическая система, точение, колебания, обработанная поверхность, шероховатость.

Key words: polymeric materials, technological system, oscillations, work pieces turning, roughness, treated surface.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание, наука), проект № 3767.

УДК 621.91.01

Введение

Известно, что качество обработанной поверхности детали зависит от характера и параметров относительных колебаний инструмента и заготовки, которые вызывают периодическое изменение толщины срезаемого слоя и сил резания, что в свою очередь, ведет к изменению размеров и появлению геометрических погрешностей у обработанных деталей, а также снижению стойкости режущего инструмента [1].

На примере токарной обработки полимерных материалов, показано [2], что колебания технологической системы станок-приспособление-инструмент-заготовка (СПИЗ) могут привести к переходу системы в потенциально нестабильное состояние и, как следствие, ухудшению параметров качества обработанной поверхности. При этом причинами перехода системы в нестабильное состояние также являются неоднородность обрабатываемого материала заготовки и внешние воздействия на материал заготовки, приводящие к изменению его структуры.

Для снижения уровня колебаний в технологической системе уменьшают режимы резания, вследствие чего существенно снижается производительность обработки, и соответственно всего технологического процесса изготовления деталей и изделий.

В данной работе поставлена следующая цель исследования – экспериментальная проверка правильности выбора режимов резания при точении заготовок из фторопласта, а также установление характера взаимосвязи между режимом резания, видом предварительной подготовки заготовок и уровнем шероховатости обработанной точением поверхности.

Методика эксперимента

Эксперименты проводились в несколько этапов. На первом этапе посредством моделирования [3] определены зоны стабильного и нестабильного состояний динамической системы при точении заготовки из фторопласта, а также проведены экспериментальные исследования процесса стружкообразования при обработке в зонах стабильного и нестабильного состояний.

Второй этап экспериментов был посвящен исследованию изменения шероховатости обработанной поверхности детали из фторопласта в зависимости от величины продольной подачи, которая варьировалась в диапазоне от 0,08 до 0,28 мм/об. Экспериментальные исследования данного этапа проводились в соответствии с разработанным способом [4]. Исследовались следующие варианты токарной обработки капролона:

- 1) токарная обработка заготовок без применения какого-либо предварительного воздействия на материал;
- 2) деформирование заготовки путем сжатия и растяжения и последующая токарная обработка;

Величина усилия деформирования выбиралась с помощью механической диаграммы нагружения фторопласта [2] из области упругой деформации и составляла 12 МПа.

В качестве выходного параметра из номенклатуры параметров шероховатости (ГОСТ 2789-73) выбрано среднее арифметическое отклонение профиля Ra .

На заключительном этапе проводилась регистрация колебаний технологической системы при точении заготовок из фторопласта при значениях продольной подачи s от 0,12 до 0,28 мм/об. Параметры режима резания: скорость резания $v = 120$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм; продольная подача $s = 0,1$ мм/об, при этом глубина резания и скорость резания поддерживались постоянными на протяжении всех исследований.

При проведении экспериментальных исследований применялась экспериментальная установка, в состав которой входит универсальный токарный патронно-центровой станок модели РТ755Ф311 и измерительный комплекс.

Измерительный комплекс использовался для регистрации колебаний, возникающих в технологической системе, и включал измеритель шума и вибрации ВШВ–003 с пьезоэлектрическим преобразователем ДН–4, который был закреплен на резцедержателе станка. Принятый электрический сигнал после аналого–цифрового преобразования поступал на ЭВМ для дальнейшего корреляционного и спектрального анализа. Для корреляционного и спектрального анализа колебаний [5] технологической системы использовалась свободно распространяемая версия программы Power Graph 3.2.

При проведении спектрального анализа определялась спектральная плотность энергии виброускорения $u(t)$, также называемая энергетическим спектром $V(f)$, определяемым как [6]:

$$V_u(f) = |U(f)|^2, \quad (1)$$

где f – частота колебаний, Гц; $U(f)$ – спектральная плотность (комплексный амплитудный спектр) виброускорения.

$$U(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2)$$

где t – время; j – мнимая единица.

Физический смысл энергетического спектра состоит в том, что энергия сигнала (виброускорения) E_u равна:

$$E_u = \int_{-\infty}^{\infty} u^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} V(f)df, \quad (3)$$

то есть энергия сигнала является результатом суммирования вкладов от различных интервалов частотной оси, а сам энергетический спектр отражает распределение энергии сигнала по частотам колебаний.

Обсуждение результатов экспериментальных исследований

На рис. 1 и 2 представлены границы зон стабильности, полученные при моделировании процесса точения заготовок из фторопласта. Экспериментальная проверка возможности появления неустойчивости при обработке фторопласта выполнялась при следующих технологических режимах обработки: продольная подача $s = 0,1$ мм/об, глубина резания $t = 1$ мм. Фотографии полученных стружек представлены на рис. 3.

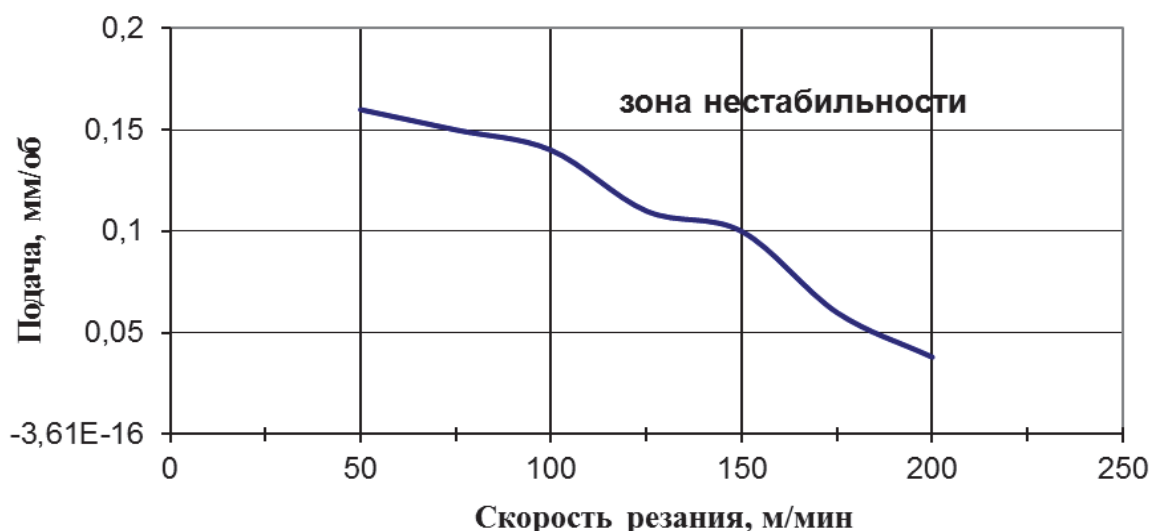


Рис. 1. Зоны неустойчивости при обработке фторопласта при глубине резания 1,0 мм

Анализ полученных данных показал соответствие характера процесса стружкообразования зонам стабильности и нестабильности технологической системы. Так, фотография стружки, представленная на рис. 3, а, соответствует процессу обработки в зоне стабильности, а стружка является сливной. Фотография стружки, представленная на рис. 3, б, соответствует процессу обработки в области перехода от зоны стабильности к зоне нестабильности, при этом стружка может считаться суставчатой. А фотография стружки, представленная на рис. 3, в, соответствует процессу обработки фторопласта в зоне нестабильности технологической системы, что наглядно подтверждается типом стружки, который можно считать элементной или стружкой скалывания.

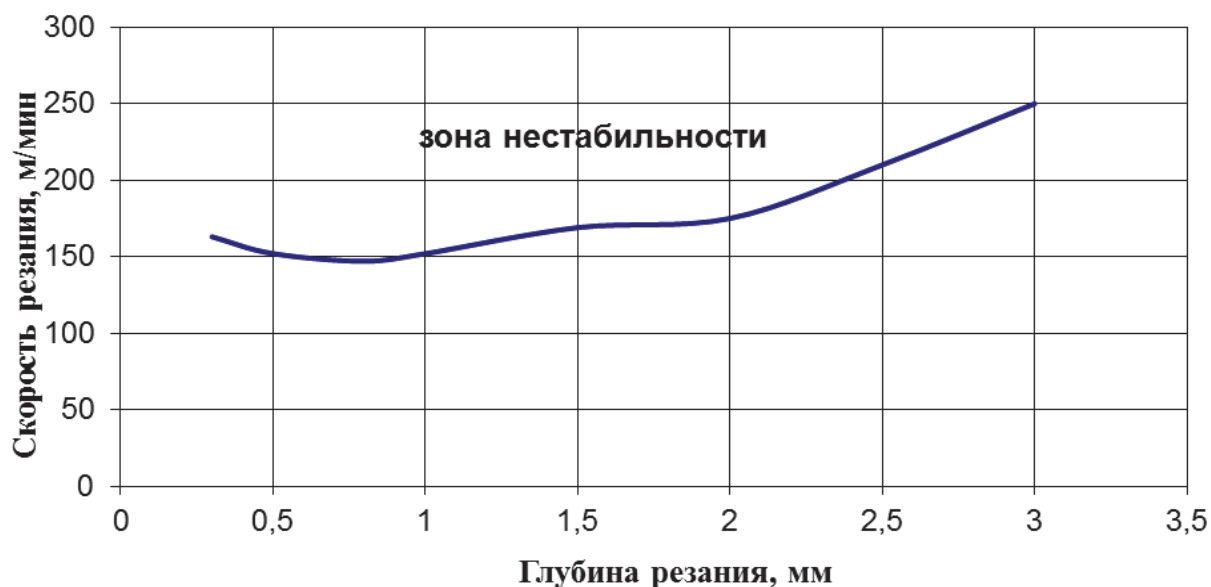


Рис. 2. Зоны нестабильности при обработке фторопласта при продольной подаче 0,1 мм/об



Рис. 3. Фотографии стружек при обработке фторопласта:
 а – скорость резания 100 м/мин; б – скорость резания 150 м/мин;
 в – скорость резания 200 м/мин

На рис. 4 графически представлены зависимости параметра шероховатости R_a от величины подачи в случае применения предварительного сжатия обрабатываемых заготовок (кривая 1) и для случая традиционного точения заготовок (кривая 2). Скорость резания составляла 120 м/мин. Как видно из рис. 4, увеличение величины подачи до 0,16 мм/об не приводит к значительным изменениям шероховатости поверхности обрабатываемых заготовок

для обоих случаев обработки, так как значения параметра R_a остаются приблизительно одинаковыми. В интервале подач от 0,16 до 0,28 мм/об наблюдается резкое снижение качества обработанной поверхности, о чем свидетельствует рост значений параметра R_a . При этом характер зависимости примерно одинаковый.

Такой характер изменения качества обработанной поверхности объясняется с помощью результатов моделирования процесса точения [3]. Согласно рис. 1 реализация процесса при скорости резания 120 м/мин, глубине резания 1 мм и подаче 0,16 мм/об приводит к нестабильному состоянию технологической системы СПИЗ, что сопровождается ухудшением условий стружкообразования и соответственно снижением качества обработанной поверхности.

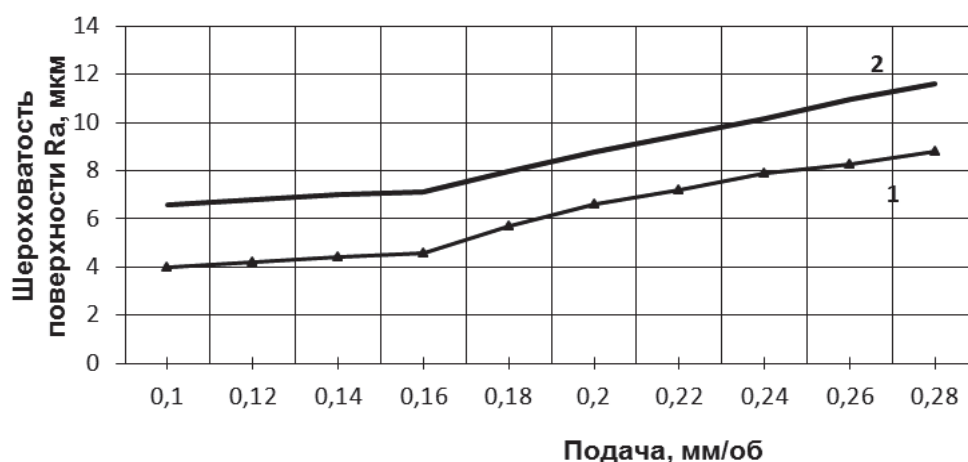


Рис. 4. Значение параметра шероховатости R_a обработанной поверхности: 1 – точение после предварительного сжатия; 2 – базовый вариант обработки

Сравнительный анализ представленных данных позволяет сделать заключение о положительном эффекте от применения предварительного деформирования заготовки путем сжатия. Об этом свидетельствует заметное (до 1,7 раза) снижение величины шероховатости обработанной поверхности предварительно нагруженной заготовки относительно величины шероховатости поверхности для базового варианта.

Общую тенденцию снижения шероховатости обработанной поверхности после предварительного деформирования путем сжатия можно объяснить следующим образом. После снятия сжимающей нагрузки на заготовку в объеме материала действуют остаточные растягивающие напряжения, наличие которых обеспечивает эффект двойного разупрочнения поверхностного слоя заготовки. Во-первых, появляются поверхностные дефекты в виде микротрещин. Во-вторых, в вершинах имеющихся и появившихся микротрещин образуются зоны перенапряжения или зоны пластической деформации. В данных зонах имеет место частичное разрушение как химических, так и межмолекулярных связей полимера [6; 7], что и является основой улучшения условий дальнейшей токарной обработки и повышения качества обработанной поверхности в соответствии с технической сущностью разработанного исследуемого способа [4].

Далее проводилась токарная обработка заготовок из капролона после предварительного растяжения. Результаты исследования зависимости параметра шероховатости R_a поверхности капролона с учетом предварительного растяжения представлены на рис. 5.

В случае точения заготовок после предварительного растяжения качество обработанной поверхности улучшается незначительно по сравнению с базовым вариантом обработки заготовок во всем диапазоне реализуемых подач (см. рис. 5). При этом также наблюдается интенсивный рост значений параметра шероховатости R_a после подачи 0,16 мм/об, что сви-

детельствует о том, что данные режимы резания нерациональны, так как технологическая система находится в зоне неустойчивости.

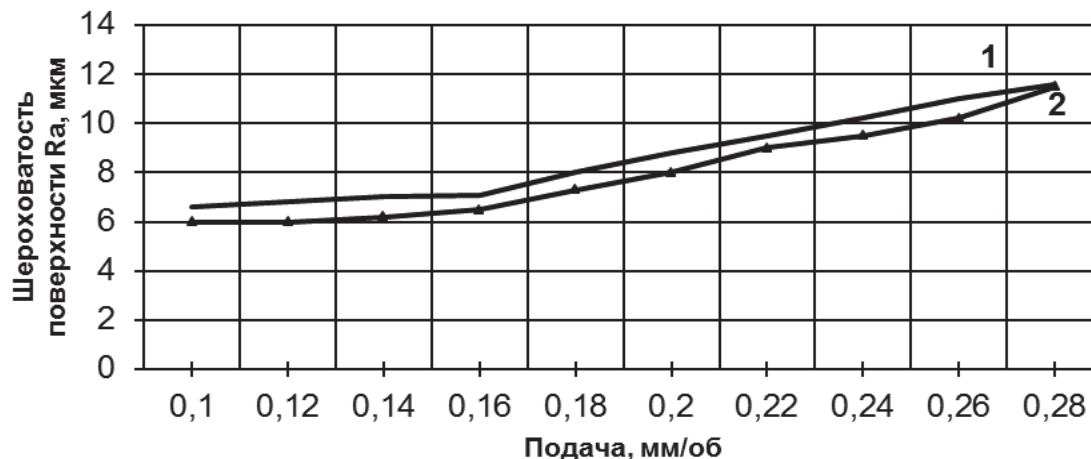


Рис. 5. Шероховатость обработанной поверхности:

1 – базовый вариант обработки; 2 – точение после предварительного растяжения

Общую тенденцию некоторого снижения шероховатости обработанной поверхности после предварительного деформирования путем растяжения можно объяснить наложением двух противоположных по своей технической сущности эффектов. После снятия растягивающей нагрузки в материале возникают, как известно, сжимающие напряжения. Данные напряжения, с одной стороны, приводят к смыканию части имеющихся микротрещин и блокируют их развитие. С другой стороны, данные напряжения, в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности, обеспечивают напряжения химических и межмолекулярных связей, т.е. некоторое технологическое ослабление поверхностного слоя заготовки. Эти эффекты, по всей видимости, преимущественно компенсируют друг друга. Однако некоторое ослабление материала все же имеет место в конечном итоге за счет образования зон перенапряжения в вершинах имеющихся трещин. Это и является причиной незначительного увеличения качества последующей токарной обработки заготовок.

Анализ всех представленных на рис. 4 и 5 данных позволяет сделать вывод о том, что характер формирования шероховатости обработанной поверхности для всех случаев обработки не изменяется, при подаче 0,16 мм/об технологическая система СПИЗ переходит в неустойчивое состояние.

На рис. 6 представлены энергетические спектры колебаний технологической системы при обработке заготовки из фторопласта со следующими параметрами режима резания: скорость резания 120 м/мин; глубина резания 1 мм; продольные подачи 0,1; 0,14 и 0,28 мм/об. Сравнительный анализ полученных энергетических спектров колебаний показывает, что спектральная плотность виброускорений колебаний технологической системы имеет примерно одинаковые значения для величин подачи 0,10 и 0,14 мм/об. С дальнейшим увеличением подачи до 0,28 мм/об наблюдается резкий рост спектральной плотности виброускорений, что можно объяснить переходом технологической системы в зону неустойчивости [2]. Факт перехода также подтверждается увеличением шероховатости обработанной поверхности соответствующих заготовок из фторопласта, как следует из данных на рис. 4 и 5.

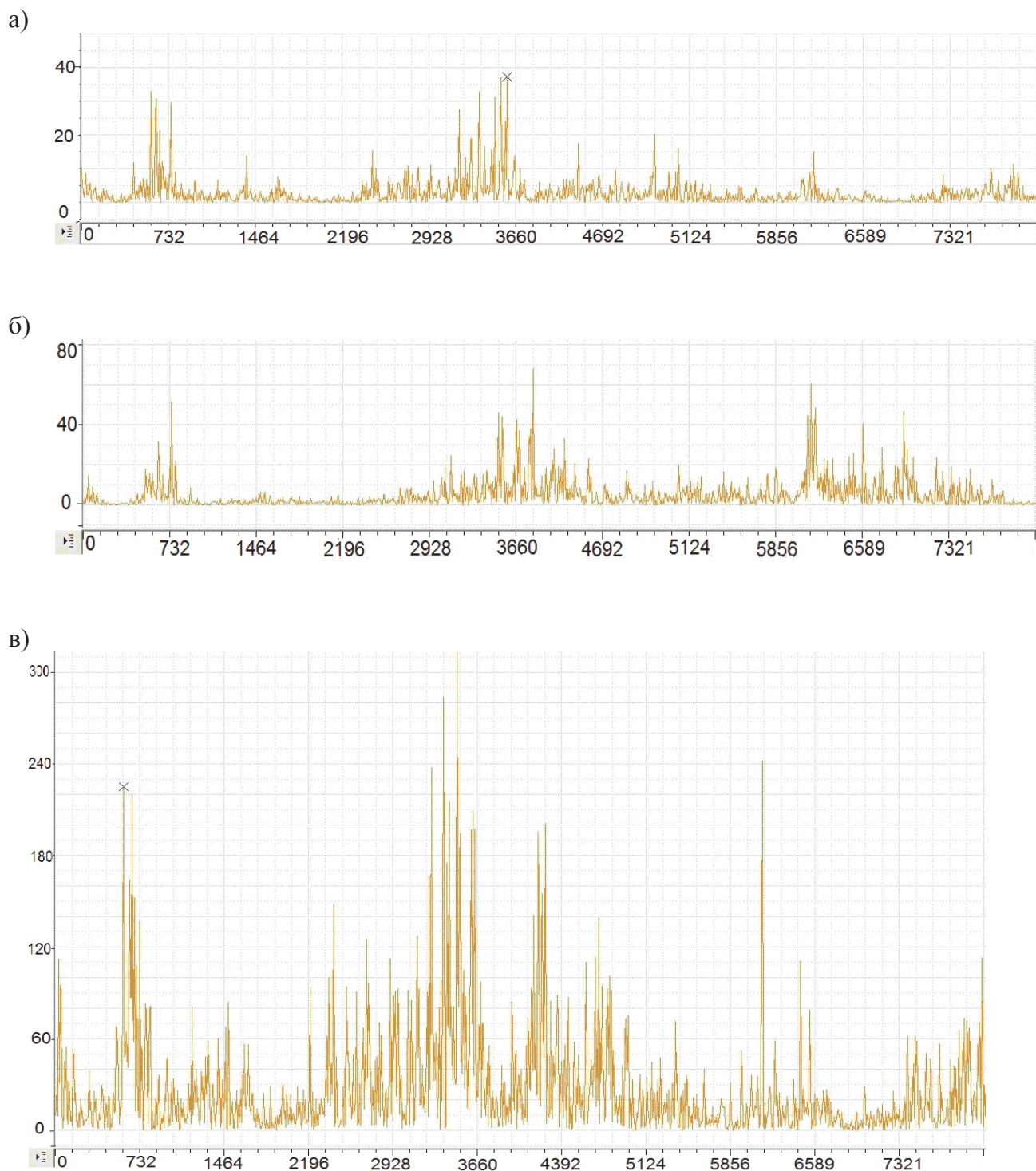


Рис. 6. Энергетический спектр виброускорения при обработке фторопласта (по оси абсцисс отложены значения частоты колебаний f , Гц; по оси ординат отложены значения энергетического спектра $V(f)$, $(\text{м/с}^2)^2 \cdot \text{с}$): а – продольная подача 0,10 мм/об; б – продольная подача 0,14 мм/об; в – продольная подача 0,28 мм/об

Вывод

Посредством моделирования процесса точения заготовок из полимерных материалов определены зоны стабильного и нестабильного состояний технологической системы СПИЗ при точении заготовок из фторопласта. Экспериментально подтвержден факт существования таких режимов точения фторопласта, реализация которых приводит к переходу технологической системы СПИЗ в нестабильное состояние, о чем свидетельствует характер процесса стружкообразования, резкое повышение шероховатости обработанной поверхности и рост спектральной плотности виброускорений колебаний системы СПИЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, В. А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания) / В. А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1992. – № 10. – С. 14-17, № 11. – С. 26 – 29 .
2. Обработка полимерных материалов резанием на основе обеспечения стабильности технологической системы и предварительных внешних воздействий на заготовки / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Ри Хосен, А. В. Гаврилова. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 270 с.
3. Еренков, О. Ю. Математическая модель нелинейных колебаний и определение условий нестабильности технологической системы при точении / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № I–1(1). – С. 45-51.
4. Пат. 2317196 Российская Федерация, МПК В 29 С 37/00. Способ обработки заготовок из пластмасс / Еренков О. Ю., Гаврилова А. В. – № 2006110788/12; заявл. 03.04.2006; опубл. 20.02.2008. Бюл. № 5. – 3 с.
5. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. – М., 1971. 316 с.
6. Erenkov, O. Yu. Modeling the SSS of a Polymer Material in Cutting with Account for Crack Interaction / O. Yu. Erenkov, A. G. Ivakhnenko // Russian Engineering Research, 2007, Vol. 27, No. 5, pp. 271–274. DOI: 10.3103/S1068798X07050073.
7. Еренков, О. Ю. Инновационные технологии механической обработки полимерных материалов резанием / О. Ю. Еренков. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – 202 с.



Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Пронин А. И.
Ye. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. Ye. Shchelkunova, A. I. Pronin

ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

THE PROGRAM FOR DESIGNING MECHANISMS OF PARALLEL STRUCTURE

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: ktm@knastu.ru.

Shchelkunov Yevgeny Borisovich – PhD in Engineering, Associate Professor of the Machine building Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: ktm@knastu.ru.

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Vinogradov Sergey Vladimirovich – PhD in Engineering, Associate Professor of the Machine building Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Щелкунова Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: kmorevm@knastu.ru.

Shchelkunova Marina Yevgenyevna – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department «Software and computer application», Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: kmorevm@knastu.ru.

Пронин Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия).

Pronin Alexander Innokentyevich – PhD in Engineering, Associate Professor of the Machine building Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia).

Аннотация. В статье представлено описание программы для ЭВМ, позволяющей значительно сократить временные затраты при проектировании и исследовании механизмов параллельной структуры, приведено изображение главного окна интерфейса программы с описанием работы основных закладок, окон и оригинальных шаблонов, позволяющих максимально формализовать все процессы расчетов параметров геометрического рабочего пространства прямым и обратным способом.

Abstract. The article describes a computer program that allows reducing significantly the time required for the design and study of mechanisms of parallel structure. The article shows the image of the main window interface describing the work of the main tabs, windows and original templates that can help to formalize all of the processes of calculating the parameters of the geometrical workspace in forward and backward manner.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, приводная штанга, шарнир, программа, металлообрабатывающий станок.

Kew words: The mechanism of parallel structure, the actuator rod, joint, program, metal working machine.

УДК 621.01

В связи с принятым страной курсом на импортозамещение перед отечественной промышленностью остро встала задача создания технологий и технологического оборудования, отвечающих высочайшим мировым требованиям.

Одним из перспективных направлений развития технологического оборудования являются металлообрабатывающие станки с параллельной кинематикой, в основе которых лежат разнообразные механизмы параллельной структуры (МПС).

В настоящее время в приводах металлообрабатывающих станков используется множество конструкций МПС, которые классифицируются по виду штанг; по количеству штанг; по характеру расположения шарниров на платформе и основании и др.

По виду и количеству штанг МПС разделяют:

- на механизмы со штангами управляемой переменной длины (бипод, трипод, пентапод, гексапод, «ножницы»);
- на механизмы со штангами постоянной длины (линапод, биглайд, триглайд, ортоглайд, гексаглайд, ротопод, «дельта», four-rod).

На рис. 1 приведена классификация МПС по количеству штанг, представленная в работе [1].

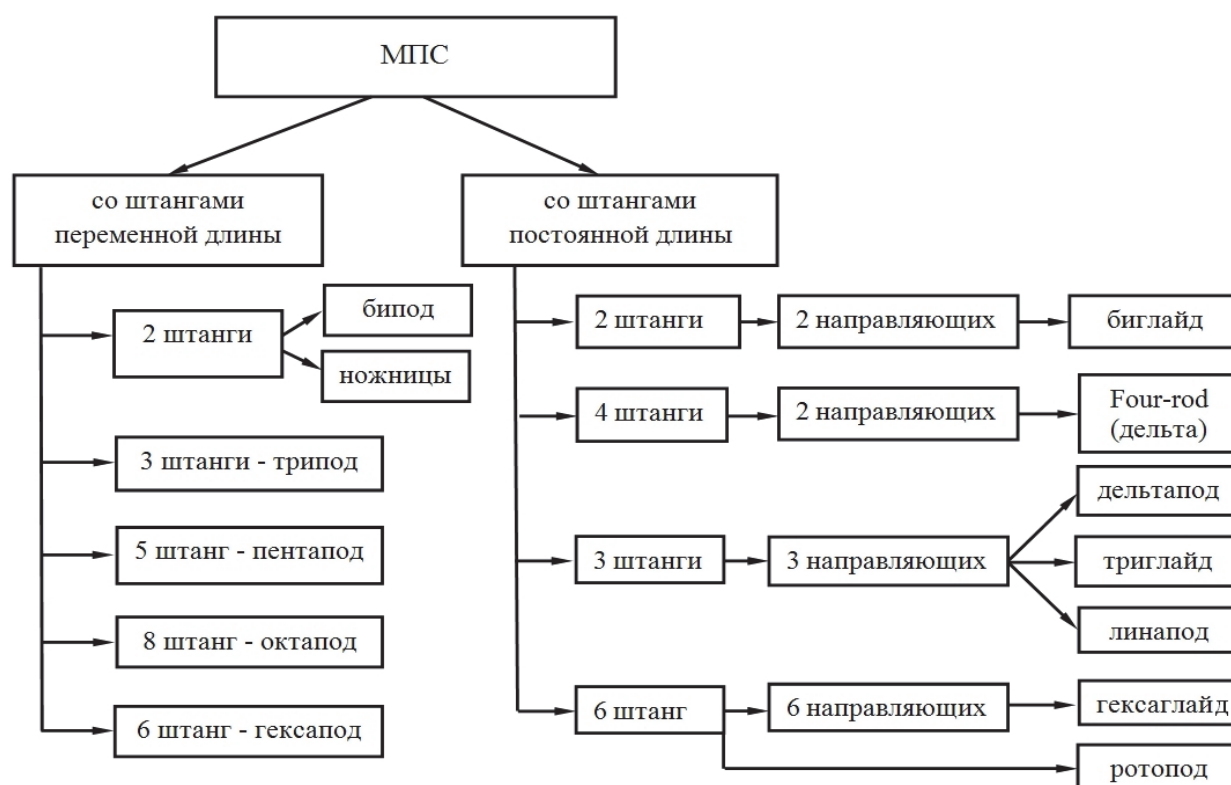


Рис. 1. Классификация МПС по количеству штанг [1]

Проектирование любого МПС является сложной конструкторской задачей, при решении которой конструктор сталкивается с необходимостью перебора множества вариантов компонок. Под компоновкой МПС понимается система расположения в пространстве основных компонентов технологического оборудования, которое обуславливает его кинематическую структуру, технологические возможности и габаритные размеры [2].

Большое разнообразие компонок МПС, применяемых в металлообрабатывающих станках, является следствием множества технологических задач, форм и размеров изготавливаемых изделий.

На начальном этапе проектирования МПС разработчик вынужден выполнять массу промежуточных расчетов, связанных с определением углов размещения шарниров на платформе и основании, увязкой размеров элементов механизма и др. Большая часть этих расчетов может быть автоматизирована с помощью специализированных программных средств, позволяющих сократить временные затраты на проектирование.

Авторами разработана программа для ЭВМ, предназначенная для выполнения расчетов, связанных с проектированием и исследованием МПС. В основу расчета положен известный математический метод, примененный Д. Янгом и Т. Ли [3].

На рис. 2 представлено изображение главного окна разработанной программы (вкладка «Расчет»). Оно визуально разделено на три области.

В области «Расчет длин штанг» осуществляется выбор компоновки МПС и ввод значений радиуса платформы, радиуса основания, количества штанг и других параметров механизма, а также задание размеров технологического рабочего пространства МПС. Под технологическим рабочим пространством понимается та область рабочего пространства МПС, в которой происходят манипуляции рабочего органа, связанные с формообразованием [4; 5].

В области «Расчет рабочего пространства» находятся поля для отображения рассчитанного значения или ввода длин штанг, типа и параметров шарниров, рассчитанных значений объема и максимальной площади рабочего пространства МПС.

В области «Расчет зависимостей длин штанг» содержатся поля для ввода значений длины обработки, шага резьбы, подачи, максимального радиуса основания, количества шагов.

При проектировании МПС программа оперирует следующими параметрами: тип компоновки; радиусы основания R и подвижной платформы r ; расстояние между основанием и платформой h ; углы между шарнирами на основании и на платформе; угол расхождения штанг; высота установки шарниров на основании и платформе; радиусы шарниров на основании $r_{\text{шо}}$ и подвижной платформе $r_{\text{шп}}$; длина приводной штанги L_{max} и L_{min} ; диаметр приводной штанги у шарнира на основании d ; диаметр приводной штанги у подвижной платформы d_1 ; параметры, определяющие углы наклона шарнира на основании e_1 и платформе e_2 ; размеры технологического рабочего пространства, т.е. его высота V , ширина Sh и длина D ; размер области расчета Z, X, Y ; объем и максимальная площадь сечения рабочего пространства механизма.

Для формализации расчетов в программе все теоретически возможные компоновки МПС разделены на типы, объединяющие в себе компоновки с наибольшим числом общих признаков (рис. 3). Для удобства задания исходных данных каждой из представленных компоновок условно присвоено собственное название [6]: «ферменная» (рис. 3, а); «попарная» (рис. 3, б); «равномерная» (рис. 3, в), «симметричная» (рис. 3, г); «асимметричная» (рис. 3, д).

Данная систематизация позволила для каждой компоновочной схемы разработать индивидуальный шаблон вычислений – строго определенный алгоритм выполнения расчетов. Разработчик может выбрать для дальнейшей проработки нужную ему схему, отсекая все остальные и применить заложенный в программе соответствующий алгоритм задания исходных данных и расчета геометрических параметров механизма, соответствующий данной компоновочной схеме.

Например, для компоновочной схемы, показанной на рис. 3, б, достаточно задать радиус основания R , радиус подвижной платформы r , радиусы шарниров на основании $r_{\text{шо}}$ и подвижной платформе $r_{\text{шп}}$, расстояние между штангами на основании L_0 и подвижной платформе $L_{\text{п}}$. Иначе, вместо значений L_0 и $L_{\text{п}}$ можно задать значение первого угла на основании θ_0 и на подвижной платформе $\theta_{\text{п}}$. В процессе задания исходных данных выполняется проверка их корректности.

Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Пронин А. И.
 ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Проектирование механизмов параллельной структуры

Расчет | Построение | Чертежи

Радиус основания R 160 Радиус платформы r 80 Количество штанг 6 Угол расхождения штанг, град. 11 Размер технологического рабочего пространства ширина Sh 100

Компоновка штанг: Ферменная Радиус шарнира на основании $r_{шo}$ 20 Расстояние между шарнирами на основании L_o 50 длина D 100

Попарная Радиус шарнира на платформе $r_{шп}$ 10 на платформе L_p 30.01 высота V 100

Равномерная на основании и платформе L 40 количество точек 100

Симметричная

Асимметричная

Расположение шарниров на основании: номер шарнира, угол от 0 до шарнира

1	8.99
2	111.01
3	128.99
4	231.01
5	248.99
6	351.01

Расположение шарниров на платформе: номер шарнира, угол от 0 до шарнира

1	49.19
2	70.81
3	169.19
4	190.81
5	289.19
6	310.81

Угол поворота платформы, град. x 0, y 0, z 0

Расчет длин штанг

Высота установки шарниров на платформе: 1: 0, 2: 0, 3: 0, 4: 0, 5: 0, 6: 0

Тип шарнира: Сферический шарнир, Карданный шарнир

Параметры на основании: e_1 1, диаметр штанги d_1 26

Параметры на платформе: e 1, диаметр штанги d 10

Размер области расчета: Z 0-2000, Y -1000-1000, X -1000-1000

Длины штанг: L_{min} 831.85, L_{max} 948.49

Расстояние между основанием и платформой h 827.99

Расчет рабочего пространства

Объем рабочего пространства 22772361.92 Максимальная площадь сечения 318334.86

Длина обработки: L_x 10, L_y 10, L_z 10 Шаг резьбы t 2 Максимальный радиус основания R_{max} 200 Количество шагов 10

Хр 0, Yp 0 Подача, м/с s 500

Расчет зависимостей длин штанг

Рис. 2. Главное окно программы

Разработанная программа реализует расчет размеров области рабочего пространства как традиционным способом, через задание исходных данных МПС, таких как R , r , h , d , D и т.д., так и обратным – путем задания размеров технологического рабочего пространства V , Sh , D и вычисления L_{max} , L_{min} , а также размеров области, определяющей размеры геометрического рабочего пространства.

Во вкладке «Построение» выполняется построение области рабочего пространства МПС. Построение может выполняться в виде трехмерного облака точек или контура, а также в виде проекций облака точек на оси X , Y , Z .

Во вкладке «Чертежи» приведены поясняющие материалы со схематическим изображением параметров МПС, которыми оперирует программа.

Заключение

Разработанная программа для ЭВМ позволяет значительно сократить временные затраты на начальном этапе проектирования механизмов параллельной структуры, за счет оригинальной формализации всех процессов расчетов и использования готовых шаблонов. В разработанной программе реализована возможность выполнения расчета параметров геометрического рабочего пространства прямым и обратным способом.

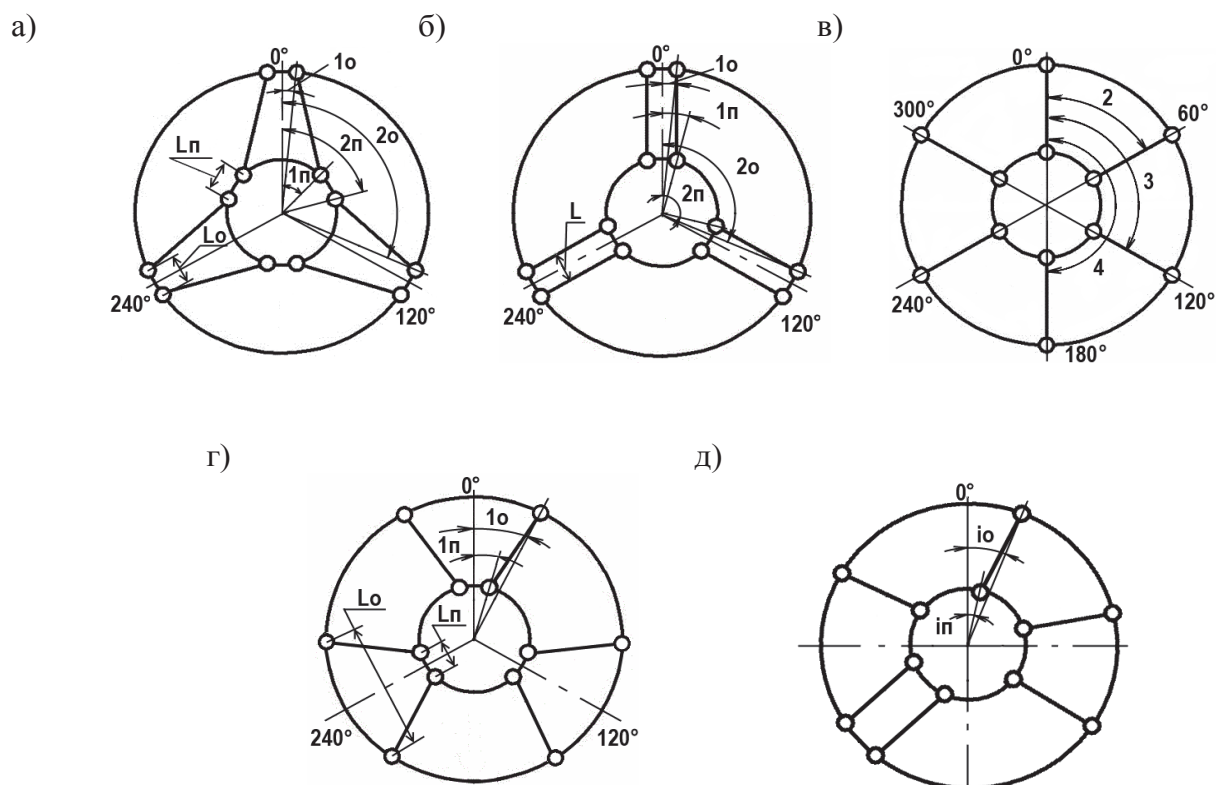


Рис. 3. Компонентные схемы механизмов параллельной структуры:
1, 2, 3, 4, 1о, 2о, 1п, 2п, i_o , i_p – углы размещения шарниров
на основании и подвижной платформе; L , L_o , L_p – расстояния между шарнирами

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкунов, Е. Б. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КНАГТУ». – 2012. – № IV-1(12). – С. 52-61.
2. Кузнецов, Ю. Н. Компонировки станков с механизмами параллельной структуры / Ю. Н. Кузнецов, Д. А. Дмитриев, Г. Е. Диневич; под ред. Ю. Н. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2010. – 471 с.
3. Янг, Д. Исследование кинематики манипуляторов платформенного типа / Д. Янг, Т. Ли // Конструирование. – 1984. – №2. – С. 264-272.
4. Щелкунов, Е. Б. Исследование взаимосвязи размеров рабочего пространства металлорежущего станка с параллельной кинематикой с геометрическими параметрами параллельного механизма / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова [и др.] // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Вып. 1. Т. 2. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 36-42.
5. Щелкунов, Е. Б. Об оценке компоновочных решений металлообрабатывающих станков с параллельной кинематикой // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой международной научно-практической конференции / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова; под ред. В. Ю. Скибы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 588 с. – С. 242-244.
6. Щелкунов, Е. Б. Автоматизация проектирования механизмов параллельной структуры // Фундаментальные исследования / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова – 2015. – № 2 (Ч. 17). – С. 3748-3752.

Сарилов М. Ю., Отряскина Т. А. Линева А. С.
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Сарилов М. Ю., Отряскина Т. А. Линева А. С.
M. J. Sarilov, T. A. Otryaskina, A. S. Linyov

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ
НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ**

**OPTIMIZATION OF THE MODES OF ELECTROEROSIVE PROCESSING
ON THE BASIS OF ECONOMIC CRITERIA**

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Sarilov Mikhail Yur'evich – doctor of technology. Sciences, Professor, head of the Department "Machines and apparatuses of chemical production", Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Отряскина Татьяна Александровна – кандидат технических наук; старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Otryaskina Tatiana Alexandrovna – Cand. the technology. Sciences; senior lecturer of the Department "Machines and apparatuses of chemical production", Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Линёв Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: uranus_123@mail.ru.

Mr. Linyov Alexander Sergeevich – graduate student of "Machinery and equipment of chemical production" Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: uranus_123@mail.ru.

Аннотация. Электроэрозионная обработка – это стохастический процесс, для которого отсутствует математическая модель. Поэтому для выбора оптимальных режимов ЭЭО, обеспечивающих максимальную производительность и качество обработанных поверхностей при изменении площади, глубины и геометрии рабочей зоны требуются обширные теоретические и экспериментальные исследования. Поэтому для разработки методики оптимизации режимов резания ЭЭО, обеспечивающих максимальную производительность и качество обработанных поверхностей при изменении площади, глубины и геометрии рабочей зоны требуются обширные теоретические и экспериментальные исследования.

Summary. Electroerosive processing is stochastic process for which there is no mathematical model. Therefore for a choice of the EEP optimum modes providing the maximum productivity and quality of the processed surfaces at change of the area, depth and geometry of a working zone extensive theoretical and pilot studies are required. Therefore development of a technique of optimization of the modes of cutting of EEP providing the maximum productivity and quality of the processed surfaces at change of the area, depth and geometry of a working zone extensive theoretical and pilot studies are required.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, производительность, оптимизация режимов, скважность, импульс, электрод.

Key words: electroerosive processing, productivity, optimization of the modes, porosity, impulse, electrode.

УДК 621.7.015

Введение

Электроэрозионная обработка представляет собой прогрессивный метод обработки, позволяющий обрабатывать труднообрабатываемые материалы. Недостатком ЭЭО является сложность адаптивного управления обработкой. Поскольку процесс формирования обработанной поверхности зависит не только от режимов обработки, но еще и от материала электрода и заготовки, от рабочей жидкости и т.д. Эти параметры не взаимосвязаны, следовательно, каждый из них вносит свое влияние на ход процесса. Поэтому исследование по оптимизации режимов обработки для повышения качества обработки и повышения производительности является актуальной научно-практической задачей.

Электроэрозионная обработка представляет собой нелинейный стохастический процесс, достаточно полная математическая модель которого отсутствует. Поэтому для выбора оптимальных режимов ЭЭО, обеспечивающих максимальную производительность и качество обработанных поверхностей при изменении площади, глубины и геометрии рабочей зоны, требуются обширные теоретические и экспериментальные исследования.

Оптимальное управление процессом электроэрозионной обработки целесообразно трактовать как неклассическую вариационную задачу. Оптимизация режимов обработки на этапе проектирования операции приводит к построению модели, включающей в себя нелинейную целевую функцию и нелинейные неравенства в качестве ограничений. В качестве целевой функции наиболее часто рассматривается мера производительности обработки или мера себестоимости операции. Для процесса электроэрозионной обработки наиболее актуальной задачей является экспериментальное и теоретическое нахождение оптимальных сочетаний параметров технологического режима с позиции экономической целесообразности

$$\frac{d\bar{\psi}}{d\tau} = \Phi(\bar{\psi}(\tau), \bar{U}(\tau), V(\tau), P(\tau), \bar{\xi}(\tau)), \quad (1)$$

где $\bar{\psi}(\tau)$ – вектор физически измеримой информации о функционировании станка; τ – текущее время; $\bar{U}(\tau)$ – вектор управления процессом электроэрозионной обработки; $V(\tau)$, $P(\tau)$ – соответственно скорость и энергоемкость процесса обработки; $\bar{\xi}(\tau)$ – вектор внешних возмущений, вызванных изменением площади обработки, углублением инструмента в деталь, изменением условий эвакуации, износом электрода-инструмента, локальным изменением свойств рабочей жидкости в МЭП, и другими факторами.

Методика исследования

Главным условием управления процессом электроэрозионной обработки является получение годной детали, удовлетворяющей требованиям точности и качества обработки. Также в процессе управления необходимо учитывать конструктивные особенности станка и электрические параметры генератора. Поэтому введем в описание процесса ЭЭО две дополнительные переменные: $\bar{y}(\tau)$ – вектор качества изготавливаемой детали; $\bar{z}(\tau)$ – вектор текущего состояния процесса обработки.

Для решения уравнения (1) необходимо принять во внимание следующие обстоятельства:

1. Вектор $\bar{y}(\tau)$ является единственным компонентом множества качества Y . Границы этого множества формируются предельно допустимыми с позиции качества получаемой детали значениями составляющих вектора $\bar{y}(\tau)$.

2. Вектор $\bar{z}(\tau)$ является единственным компонентом множества Z состояний процесса обработки. Границы этого множества формируются возможностями станка и физическими ограничениями, накладываемыми спецификой протекания электроэрозионных явлений.

Нормальный процесс электроэрозионной обработки может существовать лишь в том случае, если ни одна из составляющих вектора $\bar{z}(\tau)$ не выходит за границы множества Z , иначе возникает аварийная ситуация (например, короткое замыкание, превышение предельного износа электрода-инструмента). Важно также, что, с математической точки зрения, множества Y и Z – выпуклые.

Для анализа векторов $\bar{y}(\tau)$ и $\bar{z}(\tau)$ необходимо знать отображения Ψ_Y и Ψ_Z множеств Y и Z на множество Ψ физически измеримой информации о поведении динамической системы ЭЭО. Границы множества Ψ формируются предельно допустимыми значениями составляющих вектора $\bar{\psi}(\tau)$. Задача управления процессом электроэрозионной обработки и обеспечения качества обрабатываемой детали математически формулируется следующим образом:

$$\Psi_Y = L_Y(Y), \quad \Psi_Z = L_Z(Z), \quad (2)$$

где L_Y и L_Z – соответствующие операторы.

Техническая реализация системы управления по правилам (2) в конечном счете сводится к выделению из вектора $\bar{\psi}(\tau)$ информации о текущих значениях составляющих векторов $\bar{y}(\tau)$ и $\bar{z}(\tau)$ по отношению к границам множеств соответственно Y и Z .

При оптимальном управлении вектор $\bar{U}(\tau)$ должен удовлетворять двум следующим условиям:

$$\bar{\psi}(\tau) \in [\Psi_Y \cap \Psi_Z],$$

$$J = \int_0^{\infty} \Phi(\bar{\psi}, \bar{U}, \bar{F}, \bar{\xi}) d\tau = \text{extreme} \quad (\text{min или max}), \quad (3)$$

где J – оптимизационный функционал, который обычно описывает стоимость ($J = \text{min}$) или производительность ($J = \text{max}$) обработки.

Применительно к процессу электроэрозионной обработки условие (3) должно включать в себя определение экстремума оптимизационного функционала, который состоит из физически измеримой информации, функции управления, функции мощности, подаваемой в МЭП, и внешних возмущений.

Оптимальность параметров технологического процесса определяется экономическими показателями. Критерием эффективности электроэрозионной обработки примем целевую функцию:

$$\theta = \theta_{\text{энерг}} + \theta_{\text{инс}} + \theta_{\text{эксп}},$$

где θ – приведенные затраты на обработку одной заготовки; $\theta_{\text{энерг}}$ – стоимость энергии, затрачиваемой на изготовление детали; $\theta_{\text{инс}}$ – стоимость электродов-инструментов и рабочей жидкости, необходимых для изготовления детали; $\theta_{\text{эксп}}$ – затраты живого и овеществленного труда, связанные с эксплуатацией и обслуживанием электроэрозионного станка.

Под затратами на эксплуатацию и обслуживание станка понимается заработная плата рабочего и амортизационные отчисления.

Таким образом, целевую функцию можно представить в виде:

$$\theta = \tau_{\text{обр}} W E_{\text{эн}} + \left(\tau_{\text{обр}} + \frac{\tau_{\text{зм}}}{N_u} \right) E_{\text{экс}} + \frac{I}{N_u}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{обр}}$ – продолжительность процесса электроэрозионной обработки; W – мощность электрической энергии, подаваемой в МЭП; $E_{\text{эн}}$ – себестоимость единицы электрической энергии; $\tau_{\text{зм}}$ – продолжительность простоя станка, связанного с заменой электрода-инструмента или рабочей жидкости; N_u – число деталей, обработанных за период стойкости электрода-инструмента; $E_{\text{экс}}$ – себестоимость одной минуты работы станка; I – сумма себестоимости электрода-инструмента и рабочей жидкости.

Вначале рассмотрим случай электроэрозионной обработки одинаковых деталей с постоянными параметрами режима, для которого справедливы соотношения:

$$\tau_{\text{обр}} = \frac{V}{V_u f_u}; \quad W = \frac{W_u}{q}; \quad N_u = \gamma \cdot \tau_{\text{обр}}, \quad (5)$$

где V – объем металла, снимаемого для получения детали; V_u – объем металла, удаляемый единичным электрическим импульсом; f_u – частота следования импульсов; W_u – мощность импульса; q – скважность импульсов; γ – скорость износа электрода-инструмента;

Из выражений (4) и (5) следует, что:

$$\theta = \frac{V}{V_u f_u} \left(\frac{W_u}{q} E_{\text{эн}} + E_{\text{экс}} + \frac{\tau_{\text{зм}} E_{\text{экс}} + I}{\gamma} \right).$$

Так как значения V , $E_{\text{эн}}$, $E_{\text{экс}}$, I и $\tau_{\text{зм}}$ не зависят от режимов обработки, примем их константами. Величины V_u , W_u и γ , наоборот, следует рассматривать как некоторые функции $V_u(f_u, I_u, q)$, $W_u(f_u, I_u, q)$ и $\gamma(f_u, I_u, q)$ параметров электроэрозионной обработки, где I_u – амплитуда силы тока импульса. Поэтому математическим выражением критерия оптимальности режима может служить функция:

$$\theta = \frac{C_1}{V_u(f_u, I_u, q) f_u} \left[\frac{C_2 W_u(f_u, I_u, q)}{q} + C_3 + \frac{C_4}{\gamma(f_u, I_u, q)} \right],$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – константы, определяемые на основе справочных данных и технологической документации; причем C_1 (см³) характеризует общий объем металла, который необходимо удалить для получения детали; C_2 (р./кВтч) отражает себестоимость электрической энергии; C_3 (р./ч) характеризуется себестоимостью одного часа работы электроэрозионного станка; C_4 (р.) характеризуется стоимостью электрода-инструмента. С учетом того, что произведение $V_u f_u$ равно скорости объемного съема M_V и отношение энергии импульса W_u к его скважности q равно мощности W , потребляемой процессом ЭЭО, получим окончательный вид целевой функции, выраженной в единицах стоимости обработки, р.:

$$\theta(M_V, W, T) = \frac{C_1}{M_V(f_u, I_u, q)} \left[C_2 W(f_u, I_u, q) + C_3 + \frac{C_4}{\gamma(f_u, I_u, q)} \right] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Ограничения множества Z продиктованы возможностями электроэрозионного станка и ограничениями осуществимости процесса ЭЭО.

Величина зазора S между электродами должна быть такой, чтобы обеспечить беспрепятственную эвакуацию продуктов эрозии, т.е. выполнять неравенство $V_0 \leq V_e$, где V_0 – общий объем продуктов эрозии, образующихся в единицу времени, V_e – количество продуктов эрозии, которое может быть удалено в единицу времени, т.е. скорость эвакуации. Величина зазора не должна превосходить величину, при которой может возникать и устойчиво поддерживаться импульсный разряд и при этом желательно, чтобы она была такой, что при данных условиях обработки скорость съема имела максимально возможное значение $S_k < S = S_{\text{опт}} < S_0$, где S_k – минимальный зазор, при котором процесс съема металла прекращается, S_0 – максимальный зазор, при котором процесс съема металла может начаться.

Еще одним лимитирующим фактором осуществимости процесса ЭЭО является баланс потоков энергии подводимых и отводимых из зоны обработки. Физическое ограничение, накладываемое на мощность энергии, подаваемой в МЭП, можно выразить в виде:

$$\frac{I_u t f_u U_\varepsilon}{FT} < q_{\text{кр}},$$

где U_ε – приэлектродные падения напряжения, характерные для конкретной пары электродов; F – площадь рабочей поверхности электродов; $q_{\text{кр}}$ – плотность теплового потока, обусловленная необходимостью отвода тепла из рабочей зоны. В случае нарушения данного равенства происходит переход режима кипения рабочей жидкости (РЖ) из пузырькового в пленочный, что приводит к прекращению процесса обработки.

Ограничения множества Y обусловлены точностью формообразования и качеством обработанной поверхности. Данные ограничения были наложены:

- 1) по глубине h_0 зоны термического влияния

$$h_0(W_u) \leq h_{\text{max}},$$

где h_{max} – предельно допустимое значение глубины зоны теплового воздействия на материал электрода-заготовки;

- 2) по шероховатости получаемой поверхности

$$R_z \approx C_R I_u^{k_1} t_u^{k_2} \leq R_{z\text{max}},$$

где C_R, k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты [1];

- 3) по максимальной электрической мощности генератора импульсов

$$W(f_u, I_u, q) \leq W_{\text{max}};$$

4) по износу электрода-инструмента. Данное ограничение обусловлено воздействием разрядов в МЭП как на электрод-заготовку, так и на электрод-инструмент. Кроме того, необходимо учитывать, что при использовании углеродосодержащих рабочих жидкостей возможно появление на поверхности ЭИ защитной пирографитовой пленки, являющейся продуктом химического распада рабочей жидкости. С учетом вышеперечисленного, ограничение по износу электрода-инструмента будет выглядеть так

$$\gamma = t_u^{0,15} (k_{\gamma 1} + k_{\gamma 2} \ln I_u + k_{\gamma 3} \ln t_u),$$

где $k_{\gamma 1}, k_{\gamma 2}, k_{\gamma 3}$ – коэффициенты, учитывающие появление защитных углеродистых пленок, размеры обрабатываемой поверхности, материал электрода-инструмента.

Результаты исследований

Для решения целевой функции (6) экспериментальным путем были получены зависимости скорости объемного съема $M_V(f_u, I_u, q)$ и относительного износа $\gamma(f_u, I_u, q)$ элек-

трода-инструмента от параметров процесса ЭЭО. Для этого были назначены величины констант $C_2 = 2,65$ р./кВтч, $C_3 = 70$ р./ч (амортизация станка 4Л721Ф1, заработная плата рабочего 5 разряда, стоимость израсходованной за 1 ч рабочей жидкости), $C_4 = 800$ р. (стоимость медного электрода) и проведено несколько серий однофакторных экспериментов, выявляющих характер зависимостей $M_V(f_u)$, $M_V(I_u)$, $M_V(q)$ и $\gamma(f_u)$, $\gamma(I_u)$, $\gamma(q)$ при обработке стали 45 медным электродом на электроэрозионном копировально-прошивочном станке модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ-40-440М.

На основе экспериментально выявленных одномерных зависимостей путем нейронно-сетевой интерполяции [4] были получены необходимые для дальнейших расчетов двухмерные и трехмерные функции. Графики функций $M_V(f_u, I_u)$, $M_V(q, I_u)$, $\gamma(f_u, I_u)$ и $\gamma(q, I_u)$ представлены на рис. 1 – 4.

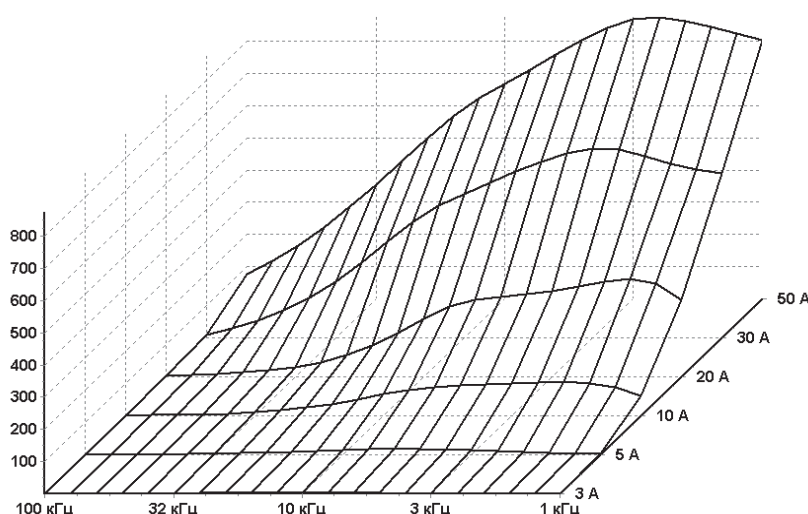


Рис. 1. Зависимость скорости объемного съема M_V (в $\text{мм}^3/\text{мин}$) от частоты следования f_u и амплитуда силы тока I_u импульсов при прошивании стали 45 медным электродом, скважность $q = 2$

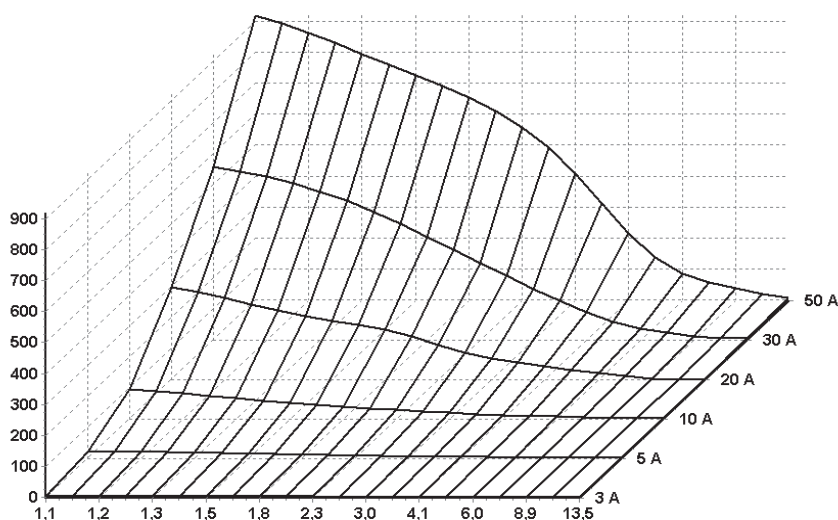


Рис. 2. Зависимость скорости объемного съема M_V (в $\text{мм}^3/\text{мин}$) от скважности q и амплитуда силы тока I_u импульсов при прошивании стали 45 медным электродом, частота импульсов $f_u = 22$ кГц

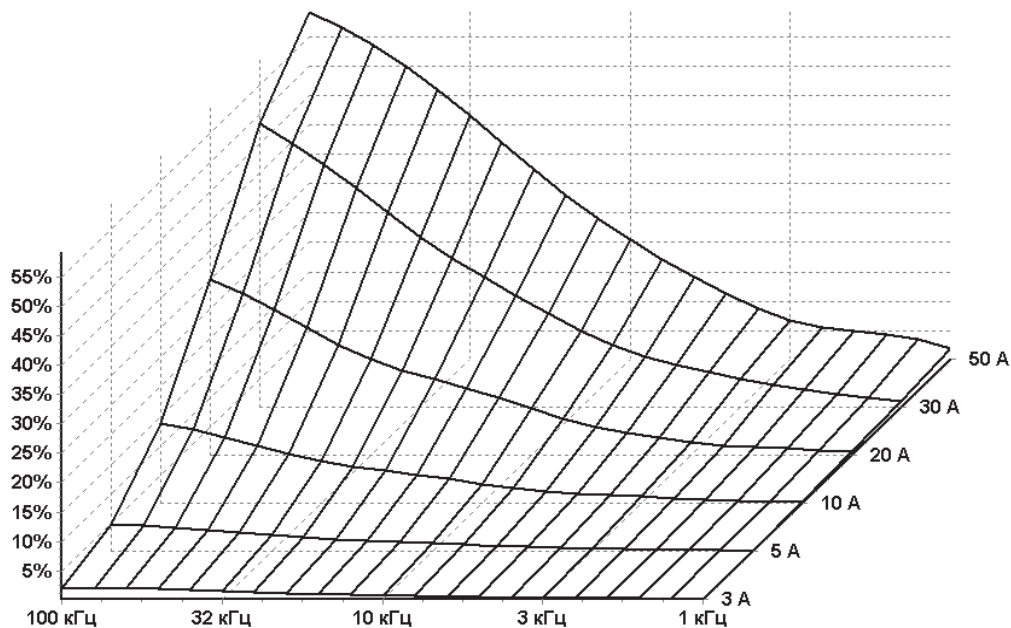


Рис. 3. Зависимость относительного износа γ электрода-инструмента от частоты следования f_u и амплитуда силы тока I_u импульсов при прошивании стали 45 медным электродом, скважность $q = 2$

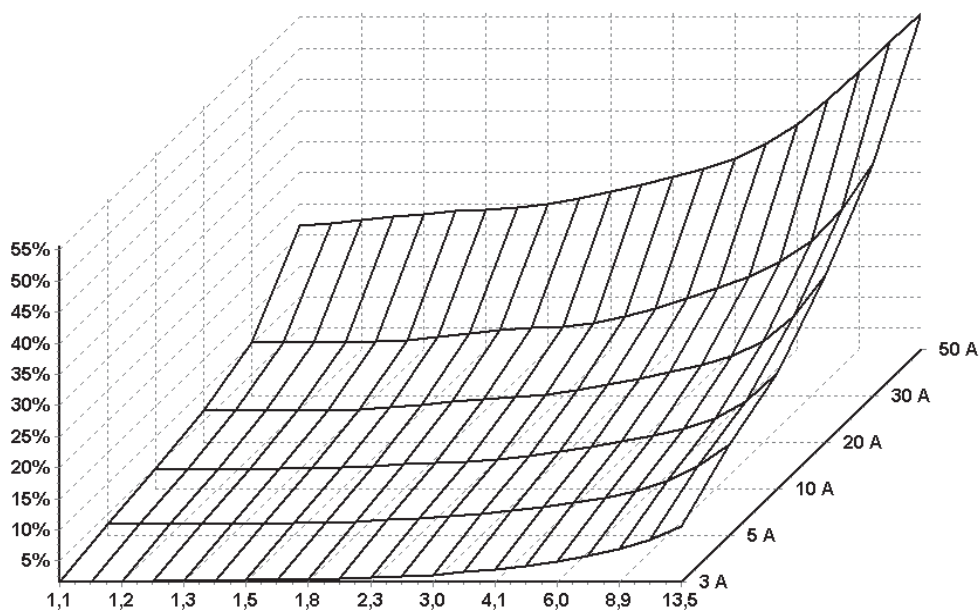


Рис. 4. Зависимость относительного износа γ электрода-инструмента от скважности q и амплитуда силы тока I_u импульсов при прошивании стали 45 медным электродом, частота импульсов $f_u = 22$ кГц

Зависимость электрической мощности, потребляемой процессом ЭЭО, $W(f_u, I_u, q)$ от параметров обработки выражается следующим образом:

$$W = \frac{I_u (U_{\delta n} + U_{\delta k}) / 2}{q}, \quad (7)$$

где $U_{\delta n}$, $U_{\delta k}$ – соответственно начальное и конечное напряжения разряда через МЭП.

График зависимости $W(I_u, q)$ для пары электродов медь – сталь 45 ($U_{\delta n} = 26$ В, $U_{\delta k} = 21$ В) представлен на рис. 5.

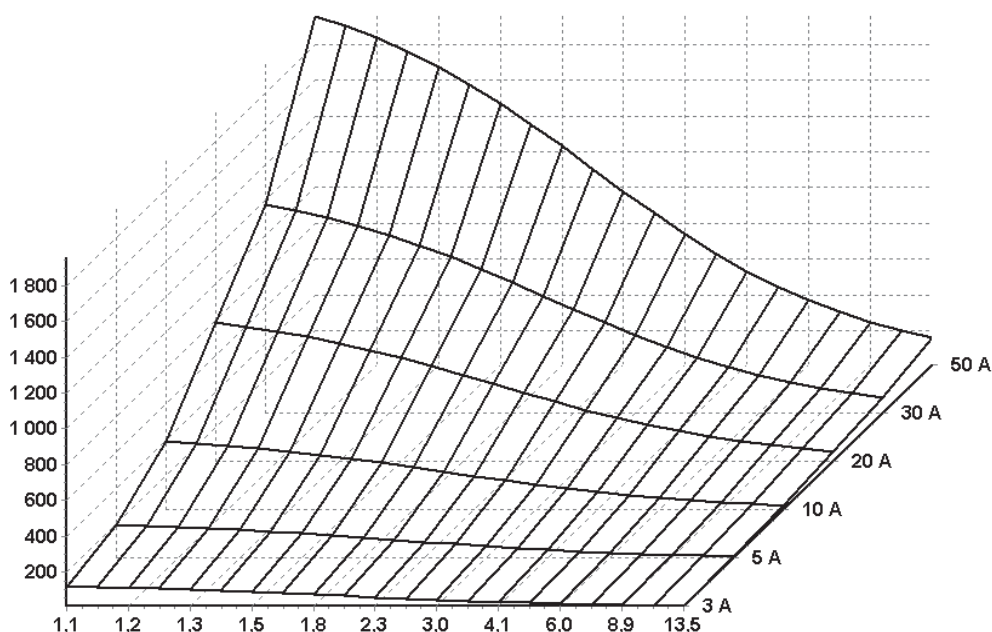


Рис. 5. Зависимость электрической мощности W , потребляемой процессом ЭЭО, от скважности q и амплитуда силы тока I_u импульсов при прошивании стали 45 медным электродом ($U_{\delta n} = 26$ В, $U_{\delta k} = 21$ В)

Подставляя полученные путем интерполяции экспериментальных данных трехмерные функции $M_V(f_u, I_u, q)$, $\gamma(f_u, I_u, q)$ и аналитическое выражение (7) в формулу (6), получим окончательный вид целевой функции. Назначив, исходя из экономических показателей процесса обработки, величины констант C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , и наложив указанные ограничения, вычислим значения целевой функции в пространстве аргументов f_u , I_u и q . График целевой функции при $f_u = 22$ кГц приведен на рис. 6.

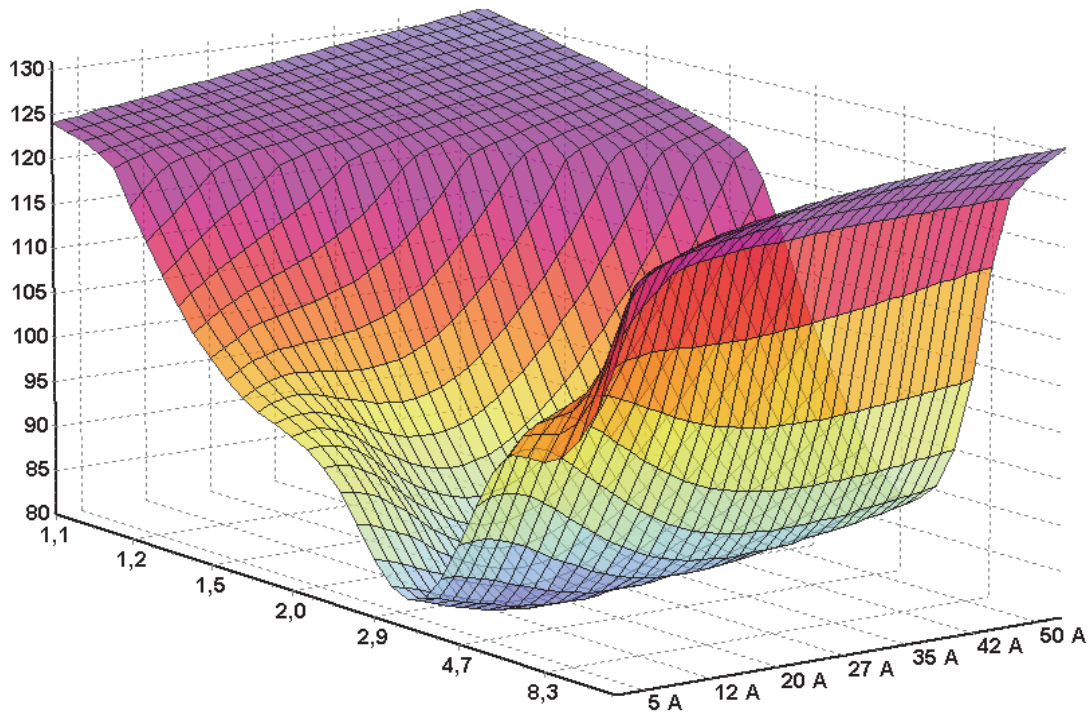


Рис. 6. График зависимости целевой функции J от скважности q импульсов (левая горизонтальная ось) и амплитуды силы тока I_u импульса (правая горизонтальная ось) при $f_u = 22$ кГц, материал электрода-инструмента – медь, заготовка (катод) – сталь 45

Анализ целевой функции (рис. 7) показывает, что при обработке стальных заготовок медными электродами с учетом требований к качеству обработанной поверхности $R_z \leq 20$ мкм ($f_u = 22$ кГц) оптимальными с позиций себестоимости получаемой детали будут режимы обработки $q = 3...4$ и $I_u = 16...20$ А. При этом производительность обработки $M_V = 75$ мм³/мин, удельный износ электрода-инструмента $\gamma = 7$ %.

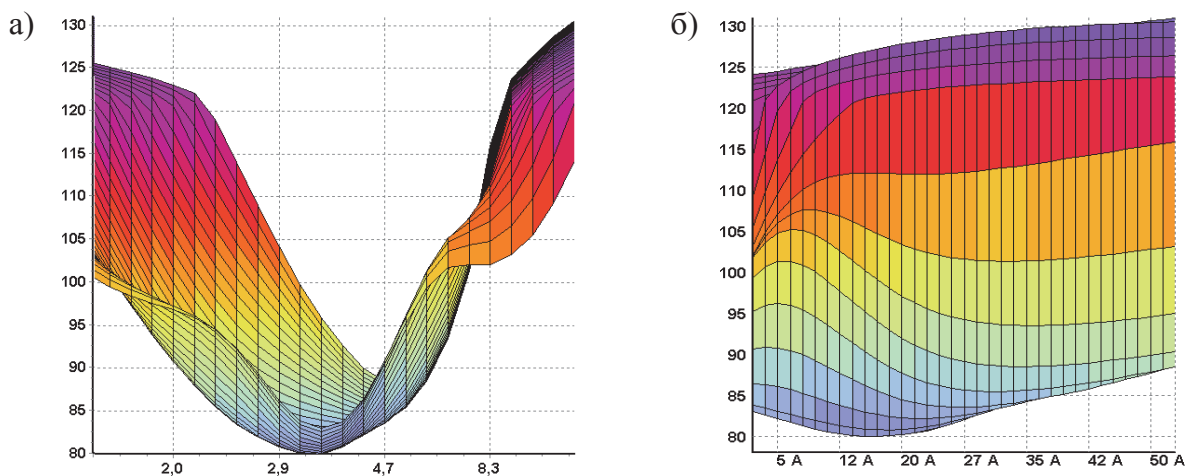


Рис. 7. Проекция целевой функции на оси скважности (а) и амплитуды силы тока (б) импульсов. Экстремум функции $q = 3,5$; $I_u = 16$ А

Аналогичным образом могут быть составлены целевые функции для любой пары электродных материалов. Необходимые для этого зависимости $M_v(f_u, I_u, q)$, $W(f_u, I_u, q)$ и $T(f_u, I_u, q)$ должны быть получены экспериментальным путем, причем трудоемкость экспериментальных исследований может быть существенно снижена (за счет сокращения количества необходимых экспериментов) при помощи нейронносетевой интерполяции.

Выводы

Данная методика оптимизации режимов ЭЭО была опробована при обработке титанового сплава ОТ4, быстрорежущей стали Р18, алюминиевого сплава АК4. Полученные результаты свидетельствуют о возможности реализации данного алгоритма в адаптивном управлении электроэрозионными станками с ЧПУ, что существенно снижает себестоимость обработки и увеличивает производительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 41 с.
2. Линёв, А. С. Механизм электроэрозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы / А. С. Линёв, М.Ю. Сарилов // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 6 (Ч. 6). - С. 1349-1353.
3. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2004. – 736 с.
4. Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта: автореф. дис. ... доктора техн. наук / Сарилов Михаил Юрьевич. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ». – 2008. – 43 с.
5. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда: учеб. руководство для вузов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
6. Сарилов, М. Ю. Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки / М. Ю. Сарилов, А. С. Линев, А. М. Злыгостев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». – 2011. – № II-1(6). – С. 57-63.

Флоров А. В.

**МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ**

Флоров А. В.

A. V. Florov

**МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ**

**CALCULATION METHOD OF TEMPERATURE FIELD AND THERMAL
DEFORMATION IN THE TOOL DURING CUTTING**

Флоров Алексей Вадимович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт конструкторско-технологической информатики Российской Академии наук» ИКТИ РАН (Россия, Москва). Москва, Вадковский пер., д. 18, стр. 1А. E-mail: florovaleksey@mail.ru.

Florov Alexey V. – PhD in Engineering, junior research scientist, Institute of Design and Technology Informatics RAS (Russia, Moscow). E-mail: florovaleksey@mail.ru.

Аннотация. В статье предложен новый методический подход к анализу движения тепла в материале инструмента. На основе разработанного метода показана вычислительная процедура расчёта температурного поля и температурных деформаций на примере реза.

Summary. A new methodological approach to the analysis is the movement of heat in the material of the instrument. On the basis of this method is a computational procedure for calculating of the temperature field and thermal deformation on the sample of the tool.

Ключевые слова: температурные деформации, температурное поле, расчет температуры.

Key words: thermal deformation, temperature field, calculation of the temperature.

УДК 621.7.02

Актуальность исследования

Процесс механической обработки сопровождается выделением тепла и появлением высоких температур в зоне резания. Количественные показатели температурного поля инструмента и, в частности, температуры зоны резания являются результатом сложного процесса механической работы и теплового баланса между инструментом, заготовкой, удаляемой стружкой, воздухом и (или) смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС). Очевидно, что значительные температуры в зоне резания являются одним из основных факторов, влияющих на стойкость обрабатываемого инструмента и получаемую точность обрабатываемой детали.

Наиболее эффективным способом отвода тепла из зоны резания является использование СОТС. Однако далеко не всегда СОТС можно использовать в технологических процессах механической обработки. Многие материалы пористые и могут в процессе резания насыщаться продуктами СОТС, что может привести к изменению физических свойств материала изделия. Особенно это свойственно современным композиционным материалам, при этом скорости обработки только растут, а, значит, растут и температуры.

Разработка способов снижения температурной нагрузки без применения СОТС или создания оптимального технологического процесса с правильным балансом между стойкостью инструмента, скоростью обработки и необходимой точностью изделия требуют проведения глубокого анализа процесса резания с расчетом температурных полей и температурных деформаций, что является необходимым в современных жестких требованиях высокопроизводительного прецизионного производства.

Методы расчета тепловых процессов

Значительный вклад в изучение тепловых процессов был сделан проф. А.Н. Резниковым и С.С. Силиным. Разработанные ими методы позволяют проводить анализ теплового баланса процесса резания и вычислять мощности тепловых потоков, направленных в инструмент, исходя из условий режимов резания и физических свойств инструмента и заготовки. Изучение и применение данных методов позволяет глубоко понять происходящие тепловые процессы в зоне резания, однако используют не точный математический метод подобия, что сказывается на результате. Несмотря ни на что они позволяют решать очень сложную задачу теплового баланса, а полученные результаты можно использовать как условия для решения следующей задачи расчета трехмерного температурного поля и температурных деформаций инструмента.

Теоретический анализ тепловых процессов требует решения дифференциального уравнения в частных производных второго порядка. Зачастую такие уравнения не решаются прямым интегрированием и требуют использовать численные методы решения дифференциальных уравнений со сложным алгоритмом большой вычислительной процедуры, особенно когда требуется получить температурное поле во всём объёме инструмента. Поэтому разработка простого и наглядного метода для анализа распределения температурного поля и температурных деформаций является актуальной задачей.

Физические основы разрабатываемого методического подхода к анализу тепловых процессов в материале

В цикле публикаций [1; 2; 3; 4; 5] нами предложен методический подход к решению задач расчета температурных полей и температурных деформаций. В его основе лежит разделение исследуемого теплофизического материала на плотно прилегающие друг к другу адиабатные трубки тока тепла, между которыми нет обмена энергией. Кривизна и длина трубок соответствуют градиенту направления движения тепла и геометрическим параметрам исследуемого тела (резца). Резец в такой виртуальной процедуре представляет собой тело, наполненное трубками, имеющими основание (вход) с одной стороны на источнике тепловой энергии, и, как правило, большее по площади основание (выход) на стоке с другой стороны (см. рис. 1).

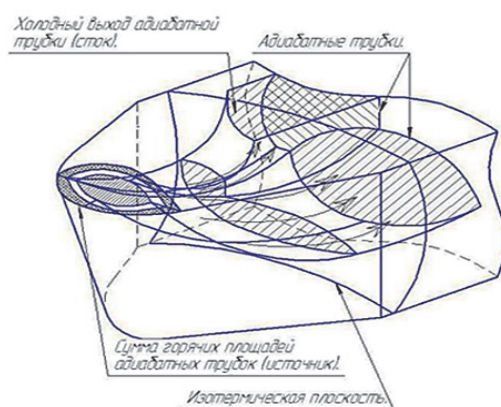


Рис. 1. Схема движения тепла вдоль адиабатной трубки

Теплопередача в границах таких трубок по градиентным направлениям, при условии стационарного теплового процесса, полностью описывается законом Фурье и снимает необходимость для описания тепловых потоков решать дифференциальное уравнение второго порядка. Поэтому, зная точные геометрические параметры и местоположение трубок в ис-

Флоров А. В.

**МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ**

следуемом материале, можно вычислять температуру в любой точке материала и получать полную картину трехмерного температурного поля.

Метод расчета трёхмерного стационарного температурного поля

Расставим некоторые акценты на очевидные условия движения тепла в границах трубок тока тепла. Каждая градиентная трубка имеет свою форму, свою кривизну, обусловленную «обжатием» всей системы трубок внешней формой тела. Каждая градиентная трубка имеет постоянный по длине трубке телесный угол и в развернутом виде представляет усеченный конус. Такой усеченный конус, имеющий площади оснований, а также высоту, равные площадям входа и выхода и длине средней линии кривой трубки соответственно, можно назвать теплофизическим аналогом. Рассмотрим такой теплофизический аналог градиентной трубки (см. рис. 2).

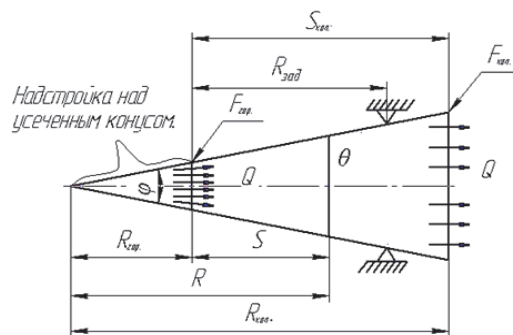


Рис. 2. Теплофизический аналог градиентной трубки

Здесь нами введено три рабочих гипотезы, которые, на наш взгляд, для большинства случаев воспринимаются как очевидные, как аксиомы.

1. Усеченный конус-аналог адиабатной трубки имеет постоянный по высоте трубки телесный угол Φ :

$$\Phi = \frac{F}{R^2} .$$

2. Для всех и каждой трубки «угловая теплонапряженность» (тепловая энергия на единицу телесного угла) всей системы трубок есть величина, равная

$$K = \frac{Q}{\Phi} .$$

3. Температура материала конуса в стационарном процессе передачи тепла при условии адиабатичности его стенок получается при прямом интегрировании закона Фурье:

$$q = \lambda \frac{di}{dR}$$

и поток тепла в конусе имеет вид

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{\Phi R^2} .$$

Поэтому

$$\frac{d\theta}{dR} = -\frac{Q}{\lambda\Phi R^2}.$$

Проинтегрируем в пределах левую часть от $\theta_{гор}$ до θ , а правую от $R_{гор}$ до R . Получим

$$\theta - \theta_{гор} = \frac{Q}{\lambda\Phi} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{гор}} \right),$$

При $R \rightarrow R_{гор}$ очевидно $\theta \rightarrow \theta_{гор}$ и вообще для любых R

$$\theta = \theta_{гор} + \frac{Q}{\lambda\Phi} \frac{1}{R} - \frac{Q}{\lambda\Phi} \frac{1}{R_{гор}}.$$

Обозначим

$$\theta_{гор} - \frac{Q}{\lambda\Phi} \frac{1}{R_{гор}} = \theta_0.$$

Поэтому

$$\theta = \theta_0 + \frac{Q}{\lambda\Phi} \frac{1}{R},$$

где θ_0 – температура материала конуса при $R \rightarrow \infty$; Q – тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности материала конуса; Φ – угол при вершине конуса (телесный угол); R – расстояние от вершины конуса до точки, в которой определяется температура (радиус).

Для каждого конуса можно записать:

$$F_{гор} = F_{хол} \frac{K}{Q} \quad \text{и} \quad Q \frac{F_{гор}}{F_{хол}} = K.$$

Это значит, что соотношение между площадями $F_{гор}$ и $F_{хол}$ зависит от угловой теплонапряженности K .

Поэтому угловая теплонапряженность должна быть такова, чтобы суммы площадей всех «холодных» и всех «горячих» ячеек были соответственно равны площадям «горячей и холодной» полусфер соответственно. Формально это будет иметь вид

$$R_{гор} = \sqrt{\frac{F_{гор}}{\Phi}},$$

$$F_{хол} = \Phi R_{хол}^2 = \Phi (R_{гор} + S)^2 = \frac{Q}{K} (R_{гор} + S)^2,$$

$$F_{хол} = \frac{Q}{K} \left(\sqrt{\frac{F_{гор}}{Q}} K + S \right)^2 \quad \text{и} \quad F_{гор} = \frac{Q}{K} \left(\sqrt{\frac{F_{хол}}{Q}} K - S \right)^2,$$

где $F_{хол}$ и $F_{гор}$ – это не суммарные, а i -е площади. То есть, задавая разбиение нашего источника $F_{гор; i}$ -е площади, мы можем находить соответствующие $F_{хол; i}$ -е площади и наоборот.

Теперь все значки у нас i -е, кроме K , и мы имеем право написать

Флоров А. В.

**МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ**

$$\sum_i \frac{Q_i}{K} \left(\sqrt{\frac{F_{\text{хол.}i}}{Q_i} K} - S_i \right)^2 = F_{\text{гор } \Sigma},$$

где Q_i , $F_{\text{хол}i}$ и S_i – исходные данные; $F_{\text{гор}\Sigma}$ – полная горячая поверхность, см².

Задаем исходное значение $K = K_0$. Решаем данное уравнение в итерационном процессе относительно K . Необходимо подобрать такое K , чтобы обеспечивался минимум представленного ниже уравнения:

$$\min_K \left(F_{\text{гор}\Sigma} - \sum_i \frac{Q_i}{K} \left(\sqrt{\frac{F_{\text{хол}i}}{Q_i} K} - S_i \right) \right)^2, \quad (1)$$

где $F_{\text{гор}\Sigma}$ – суммарная площадь источника; Q_i – тепловые потоки в адиабатных трубках; $F_{\text{хол}i}$ – это не суммарные, а i -е площади торцов (стоков) адиабатических трубок.

После выполнения этой работы можно провести итерацию по уточнению картины градиентов в меридиональных плоскостях тела и повторить по уточнению измерениями длин средних градиентов расчет по вычислению угловой теплонапряженности, устанавливающей соответствие «горячих и холодных» площадей адиабатных трубок.

Вторая гипотеза с учетом первой говорит о том, что равные температуры внутри тела будут на равных радиусах от вершин конусов.

Третья гипотеза показывает, что величина K «угловой теплонапряженности» должна быть определена из геометрических соотношений тела. Действительно, при заданной холодной поверхности тела ее горячая поверхность по соотношениям площадей входа и выхода конуса зависит от теплонапряженности.

При известном K мы можем вычислять углы φ и площади холодных торцевых оснований трубок, а значит мы знаем их точное расположение в материале.

Система трубок, построенная на таком принципе, при заданном температурном поле на входе в блок материала позволяет определить тепловые потоки и температурное поле во всем блоке, в том числе и на плоскостях стоков. Здесь необходимо иметь в виду, что увеличение температурного поля на входе при неизменном тепловом потоке входа увеличивает тепловой поток во внешнюю среду с плоскостей-стоков. Равенство заданного потока на входе и потока во внешнюю среду говорит о том, что при данном температурном поле на входе устанавливается стационарный режим теплового процесса.

Такая задача алгоритмизируется и решается минимизацией квадрата отклонения температурного потока на входах от потока во внешнюю среду по температуре поля на входе и имеет вид

$$\min_{\theta_0} \left\{ Q_{\text{ист}} - Q_{\text{ст}}(\theta_0) \right\}^2, \quad Q_{\text{ст}} = \beta F_{\text{хол}} \theta_{F_{\text{хол}}}(\theta_0),$$

где $Q_{\text{ист}}$ и $Q_{\text{ст}}$ – тепловые потоки на источнике и на стоке; β – коэффициент теплоотдачи; $F_{\text{хол}}$ – площадь стока; $\theta_{F_{\text{хол}}}$ – температура поверхности стока.

Представленная выше методика позволяет достаточно точно, не используя громоздкого математического аппарата, определять трехмерное температурное поле стационарного теплового процесса при заданном тепловом потоке на входе.

Метод расчета трехмерного нестационарного теплового поля

Однако ряд задач требует от нас модель нестационарного температурного поля. В упомянутых [1; 2; 3; 4; 5; 6] работах принято, что вся система адиабатных трубок тела при

любом режиме накопления и движения тепла происходит в границах их стационарной топологии. Мы можем рассматривать нестационарный режим как режим в системе геометрии адиабатных трубок стационарного режима. В этой концепции мы проводим наш анализ стационарного режима в отдельном теплофизическом аналоге адиабатной трубки, как в элементе системы стационарных трубок. При этом задачу решаем не прямым интегрированием закона Фурье, а интегрированием уравнения теплофизики в частных производных второго порядка, которое имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где $\omega = \frac{\lambda}{C}$ - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент теплопроводности; C - коэффициент теплоемкости; T - температура; τ - время.

По направлению градиента S внутри трубки тепло от точки на источнике до точки на стоке пройдет расстояние ∂S за время $\partial \tau$ так, что температура в ней увеличится на ∂T . То обстоятельство, что $\partial S^2 = \partial x^2 + \partial y^2 + \partial z^2$ в прямоугольной системе координат (где ∂x , ∂y , ∂z - координаты ∂S) есть вектор в своих координатах, то есть простейший тензор, инвариантный к преобразованию координат (∂S не меняется от поворота системы координат относительно точки 1), позволяет нам направление dS совместить с одной из осей dy координат, а две другие dx и dz разместить в изотермической плоскости, температуры в которой не меняются от точки к точке и производные от температуры при переходе от точки к точке которых равны нулю. Тогда уравнение (2) в новой системе координат примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \omega \frac{\partial^2 T}{\partial S^2}, \quad (3)$$

где $\omega = \frac{\lambda}{C}$, а $\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{q}{C}$ или $\frac{\partial^2 T}{\partial S^2} = \frac{q}{\lambda}$; q - поток тепла на единицу площади поперечного сечения.

Проинтегрируем последнюю производную по S в пределах от $S = 0$ до S . Получим

$$\frac{\partial T}{\partial S} = \int_0^S \frac{\partial^2 T}{\partial S^2} \partial S = \int_0^S \frac{q}{\lambda} \partial S = \left|_0^S = \frac{q}{\lambda} S,$$

где $S \geq 0$.

Сравним первый член уравнения (3) с последним результатом. Получим скорость распространения тепла:

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} / \frac{\partial T}{\partial S} = \frac{\lambda}{CS}.$$

Разделим переменные последнего дифференциального уравнения и проинтегрируем его в пределах от $S = 0$ до S и $\tau = 0$ до τ , где $S \geq 0$ и $\tau \geq 0$. Получим

$$S \frac{dS}{d\tau} = \frac{\lambda}{C} \text{ или } SdS = \frac{\lambda}{C} d\tau \text{ и } \frac{S^2}{2} = \frac{\lambda}{C} \tau \text{ или } \tau = \frac{C}{2\lambda} S^2. \quad (4)$$

Это зависимость между протяженностью по расстоянию и временем перемещения определенной температуры по градиенту.

Флоров А. В.

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ

Итак, в рассматриваемый элемент входит Q_1 , а выходит Q_2 . Кроме того, в соответствии с уравнением (3) внутри элемента адиабатной трубки появляется тепло, выраженное первым и вторым членами уравнения (3), равными по величине и разными по знаку. Их сумма равна нулю и не меняет тепловой баланс элемента. Поэтому $Q_1 = Q_2 = Q = \text{const}$ и режим движения тепла стационарный. Как мы уже сказали, температуры при стационарном режиме не меняются со временем, и сам режим имеет смысл только как некоторый предельный по времени t , стремящийся к бесконечности ($t \rightarrow \infty$). Однако в элементе трубки на стыке её горячей и холодной части, где с горячей стороны поступает тепло Q , устанавливается стационарный режим. Нестационарный режим есть стационарный режим, поступательно овладевающий нетронутой теплом трубкой, шаг за шагом, элемент за элементом, со скоростью, определяемой формулами (4). Этим определяется нестационарное температурное поле.

Метод расчета температурных деформаций

Применим рассматриваемую методику к расчету температурных деформаций инструмента. Для определения линейного удлинения резца достаточно знать функцию изменения температуры по длине нашего инструмента, принимая по сечению резца среднее значение температуры.

Наиболее отдаленные друг от друга точки на источнике с одной стороны и на стоке с другой соединяются прямой трубкой по тепловой оси тела через центр его теплового объема [6]. Такая центральная трубка с небольшим допущением имеет усредненную по сечению температуру нашего резца.

Представим уравнение линейного теплового удлинения в дифференциальном виде:

$$d\Delta = \beta(\theta_u) dl,$$

где β – коэффициент линейного удлинения материала; $\theta_u = \theta_0 + Q \frac{1}{\lambda \phi R}$ – функция изменения температуры инструмента по длине трубки; dl – элемент длины, на котором произошло изменение температуры.

В концепции движения тепла по адиабатным трубкам тока для вычисления линейного удлинения достаточно знать изменение температуры в центральной группе трубок, ограниченных сечением заделки (крепления резца в резцедержателе), что существенно облегчает нашу задачу. Проинтегрируем представленное выше уравнение по длине нашей трубки от $R_{\text{гор}}$ до $R_{\text{зад}}$ (см. рис. 2):

$$d\Delta = v \left(\theta_0 + \frac{Q}{\lambda \phi R} \right) dl, \quad \Delta = \int_{R_{\text{гор}}}^{R_{\text{зад}}} v \left(\theta_0 + \frac{Q}{\lambda \phi R} \right) dl.$$

Так как $\frac{Q}{\phi} = K$, можно записать

$$\Delta = v \int_{R_{\text{гор}}}^{R_{\text{зад}}} \left(\theta_0 + \frac{K}{\lambda R} \right) dl = v \theta_0 \int_{R_{\text{гор}}}^{R_{\text{зад}}} dl + v \frac{K}{\lambda} \int_{R_{\text{гор}}}^{R_{\text{зад}}} \frac{dl}{R},$$

$$\Delta = v \theta_0 \left(R_{\text{зад}} - R_{\text{гор}} \right) + v \frac{K}{\lambda} \ln \frac{R_{\text{зад}}}{R_{\text{гор}}}.$$

В итоге получаем формулу для расчета линейного удлинения резца Δ :

$$D = v \left(i_0 (R_{\text{зад}} - R_{\text{гор}}) + \frac{K}{L} \ln \frac{R_{\text{зад}}}{R_{\text{гор}}} \right). \quad (5)$$

Полученная нами формула (5) для вычисления линейного удлинения резца не требует вычислять значений температур во всем инструменте. Достаточно вычислить температуру стока, то есть температуру холодной поверхности инструмента, и по этой температуре, при известном коэффициенте теплоотдачи, используя формулу (5), получить θ_0 . Значение коэффициента K получаем по формуле (1), представленной выше.

Предложенный методический подход, основанный на выделении геометрических параметров градиентных направлений движения тепла, позволяет проводить полноценный тепловой анализ, вычислять время выхода на стационарный режим, температурное поле исследуемого материала и температурные деформации инструмента (резца). Входными данными для расчетов могут являться как тепловой поток, направленный в инструмент, так и температура инструмента на стоке (т.е. температурное поле инструмента на его поверхности, не контактирующей со стружкой и деталью).

Последнее условие позволяет нам проводить исследование от обратного, используя результаты тепловизионной съемки, как входные данные для расчетов. Точность тепловизионной съемки лежит в пределах сотых градуса, а значит, расчеты температурного поля и тепловых деформаций можно существенно уточнить по данным тепловизора. Используя тепловизионные данные и проводя расчет от температуры стока, можно вычислять тепловые потоки и уточнять результаты теплового баланса.

В любом случае для полноценного и точного теплового анализа имеет смысл применение тепловизионного исследования для подтверждения или уточнения полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флоров, А. В. Математическое моделирование температурного поля в материале при резании / А. В. Флоров // Международный научно-технический сборник «Харьковского Политехнического Института». – Харьков, 2012. – С. 296-297.
2. Флоров, А. В. Разработка методического подхода к расчету температурного поля в инструменте при резании / А. В. Флоров // Сборник тезисов докладов 15 международной научно-технической конференции «Технология-2012». – Орел, 2012. – С. 262-264.
3. Куликов, М. Ю. Разработка методики расчета температурного поля в инструменте при резании / М. Ю. Куликов, А. В. Флоров // Научно-технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» Государственного университета – учебно-научно-производственного комплекса (ФГБУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»). – Орёл, 2012. – № 2-4(292)2012. – С. 77-83.
4. Куликов, М. Ю. Математическое моделирование теплового состояния инструмента при колесо-токарной обработке / М. Ю. Куликов, А. В. Флоров, Сан Маунг // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №3(43). – С. 161-164.
5. Куликов, М. Ю. Разработка математической модели тепловых полей и тепловых деформаций в материале при резании / М. Ю. Куликов, А. В. Флоров, Сан Маунг // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – Т. II. – № 5. – 2012. – С. 40-42.
6. Флоров, А. В. Повышение точности чистовой токарной обработки деталей из алюминиевых сплавов путем снижения температурных деформаций инструмента: дис. ... канд. техн. наук / Флоров Алексей Вадимович. – М., 2013. – С. 5-112.

Верхотуров А. Д., Макиенко В. М., Коневцов Л. А., Востриков Я. А.
A. D. Verkhoturov, V. M. Makienko, L. A. Konevtsov, Ya. A. Vostrikov

**ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕМ И ТИТАНОМ**

**INCREASE THE HEAT RESISTANCE OF HARD ALLOYS
BY ELECTRO-SPARK ALLOYING OF ALUMINUM AND TITANIUM**

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск).

E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – doctor of engineering, professor, senior research Fellow, institute for water and environmental problems, the far eastern branch of the Russian academy of sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Макиенко Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология металлов» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.

Mr. Victor M. Makienko – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology, the Far-Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.

Коневцов Леонид Алексеевич – научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

Mr. Leonid A. Konevtsov – research fellow, institute for materials technology, the Khabarovsk research center of the far eastern branch of the Russian academy of sciences (Russia, Khabarovsk).

E-mail: konevts@narod.ru.

Востриков Ярослав Алексеевич – инженер Дальневосточного Государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Mr. Yaroslav A. Vostrikov – engineer, Far Eastern state transport university (Russia, Khabarovsk). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Аннотация. В работе проанализированы методы поверхностного упрочнения инструментальных материалов, показано, что при нагреве твёрдых сплавов на их поверхностях образуются оксиды, твёрдость которых ниже твёрдости основы. Они имеют низкую прочность сцепления с основой. Показано, что при электроискровом легировании алюминием и титаном в легированном слое образуются жаростойкие соединения.

Summary. The article describes methods of surface hardening of tool materials, shows that during the heating of hard alloys on their surfaces form oxides, toughness is lower than the hardness of the substrate. They have a low adhesion to the substrate. It is shown that electro-spark alloying aluminum and titanium in the doped layer formed refractory compounds.

Ключевые слова: электроискровое легирование, поверхностный слой, твёрдый сплав, жаростойкость.

Key words: electro-spark alloying, the surface layer, hard alloy, heat-resistance.

УДК 621.793

Введение

Наука и практика располагают многочисленными методами поверхностного упрочнения режущих инструментальных материалов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. В машиностроении, металлообработке, горном деле и других отраслях производства наибольшее распространение в качестве таких материалов получили вольфрамсодержащие твёрдые сплавы (ВТС) [2; 5]. Однако цена вольфрама W на мировых рынках непрерывно растёт. В связи с этим проблема повышения работоспособности ВТС, используемых в качестве режущего инструмента, является актуальной.

В мировой практике упрочняющие покрытия на ВТС, как правило, получают методами химического и физического осаждения покрытий (PCVD и PVD соответственно). Эти методы требуют существенных экономических вложений, в связи с чем в нашей стране значительная часть ВТС выпускается без покрытий. Однако в последнее время большой интерес для упрочнения исполнительных поверхностей ВТС вызывает метод электроискрового легирования (ЭИЛ).

При рабочих режимах резания происходит нагрев ВТС до 800 °С и выше. При этом происходит интенсивное окисление рабочих поверхностей, что требует их защиты. Формирование защитного легированного слоя (ЛС) ВТС методом ЭИЛ с применением алюминия Al и титана Ti даёт эффект жаростойкости, но требует в настоящее время дополнительного изучения и остаётся актуальным. Данная работа направлена на исследование защитных свойств ВТС и повышение их работоспособности за счёт упрочняющих покрытий ВТС методом ЭИЛ.

Методы, материалы и оборудование

Для обоснования применяемого метода создания защитных покрытий был выполнен анализ (табл. 1). Видно, что к наиболее наукоёмким методам высокоэнергетического воздействия относятся методы ЭИЛ и лазерной обработки.

Выбранный для исследований метод ЭИЛ обеспечивает значительное уменьшение затрат на основные фонды, обладает простотой использования и существенными технологическими возможностями.

В качестве объектов исследования были использованы отечественные промышленные образцы ВТС двух групп: ВК (ВК3, ВК8, ВК15) и ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4), использовалась также сталь 45 и титановый сплав ВТ3.

В качестве легирующего электрода применялся алюминий Al и промышленный твёрдый сплав ТН20.

Следует отметить, что в качестве покрытий ВТС применяют также следующие соединения алюминия Al: TiAl, Al₂O₃, α-Al₂O₃, Al₂SiO₅, TiCN-AlN, которые обладают наименьшей схватываемостью с обрабатываемой сталью при резании [2; 6]. Кроме того, соединения алюминия Al могут защищать поверхности ВТС от химического износа [4] и снижать процессы ползучести и пластической деформации на площадках контакта, предотвращая образование вторичных структур в процессе схода стружки.

Для ЭИЛ использовалась установка Элитрон-14А, режимы варьировались в пределах её технических характеристик. Использовались режимы ЭИЛ, полученные опытным путём и обеспечивающие лучшую сплошность покрытия. В качестве примера приведем параметры режима № 3: $C = 60$ мкФ, $F = 400$ Гц; $U = 80$ В; длительность нанесения слоя на 1 см² варьировалась в пределах 120 с [3]. Исследования образцов по температурному окислению выполняли на дериватографе Q-1000 при нагреве со скоростью 20 °С/мин от 25 до 1000 °С и охлаждении на воздухе в течение 1 ч.

Верхотуров А. Д., Макиенко В. М., Коневцов Л. А., Востриков Я. А.
ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ
ЛЕГИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕМ И ТИТАНОМ

Таблица 1

Оборудование и методы поверхностного упрочнения

Метод нанесения покрытия / Прибор	Вход, В	Вес, кг	Максимальная толщина, мм	Среда обработки (МЭП)	Стоимость	Уровень и количество обслуживающего персонала
ЭИЛ / UR-121	220	7,8	0,07	Воздух	67 000 р.	Один человек, инженер
Вакуумное напыление / «ВАТТ 400»	380	2000	2 – 8	Вакуум, водяное охлаждение	От 1 300 000 р.	Более 1 человека, квалифицированный персонал
ХГН «г. Новосибирск, институт теоретической и прикладной механики СО РАН»	220	65	0,02 – 2,00	Газ под давлением	От 600 000 р.	Более 1 человека, квалифицированный персонал
Наплавка / «ПКТБА-УН-1Г»	380	48	0,1 – 10,0	Газ, флюс	45 000 р.	Один человек, инженер
Плакирование / «BoreClad»	230	Более 150 кг	1,0 – 5,5	Проволока	От 900 000 р.	Более 1 человека, подготовленный персонал
Гальваническое осаждение / Установка химического никелирования»	380	150	1	Химические реагенты, вода, газ для просушки	От 500 000 р.	Более 1 человека, квалифицированный персонал
Лазерное упрочнение / СКАТ 301	380	230	0,8	Воздух, CO2	От 2 000 000 р.	Один человек, инженер

Результаты и обсуждения

На рис. 1 показано изменение удельного прироста массы образцов при нагреве со скоростью 20 °С/мин от 25 до 1000 °С из модельных материалов: W, WC, Co, TiC, а также образцов металлокерамических материалов ВТС. Было установлено, что окисление исследуемых материалов (q , г/м²) до температуры 650 °С незначительно, а затем интенсивно растёт.

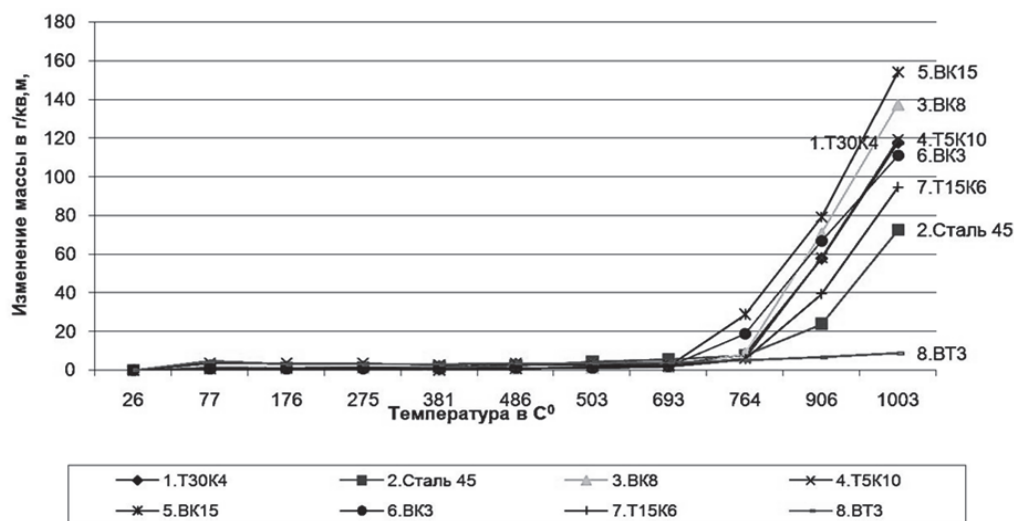


Рис. 1. Изменение удельного прироста массы в диапазоне рабочих температур при нагреве со скоростью 20 °С/мин до 1000 °С и охлаждении в течение 1 ч

Из полученных данных следует, что жаростойкость ВТС возрастает с увеличением содержания в них TiC, что наиболее заметно при содержании TiC более 10 %.

Повышение жаростойкости исследуемых образцов можно представить в виде ряда по высоте образуемого «нароста» окислы: BK3 → BK6 → BK8 → WC → T5K10 → TT10K8 → BK8ИМ → T15K6 → T30K4 → W → Co → TiC.

На рис. 2 показан вид поверхности ЛС, нанесённого при ЭИЛ Al/BK8. Химический состав поверхности ЛС показал в нём содержание следующих элементов: С, N, O, Al, Co, W (см. табл. 2, рис. 3).

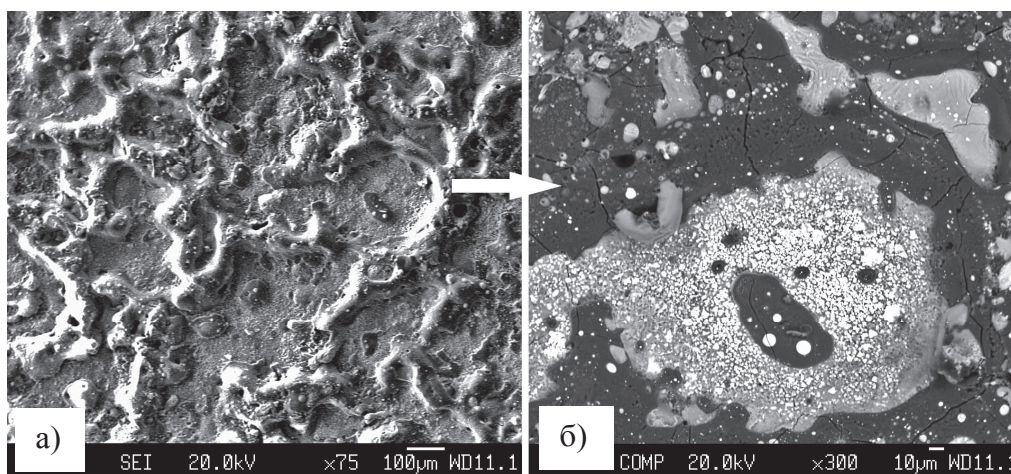


Рис. 2. Вид участка поверхности ЛС при ЭИЛ Al/BK8: а – 75^х; б – 300^х

Интерес представлял фазовый состав ЛС и его изменение при повышении температуры до рабочих значений, достигаемых в процессе резания (см. табл. 3).

Таблица 2

Полуколичественный химический состав покрытия Al/BK8

Spectrum	N	O	Al	Co	W	Total
Скан 75 ^х	2,70	16,05	41,47	1,90	19,86	81,99
Скан 300 ^х	3,10	16,64	45,62	2,19	20,28	88,33

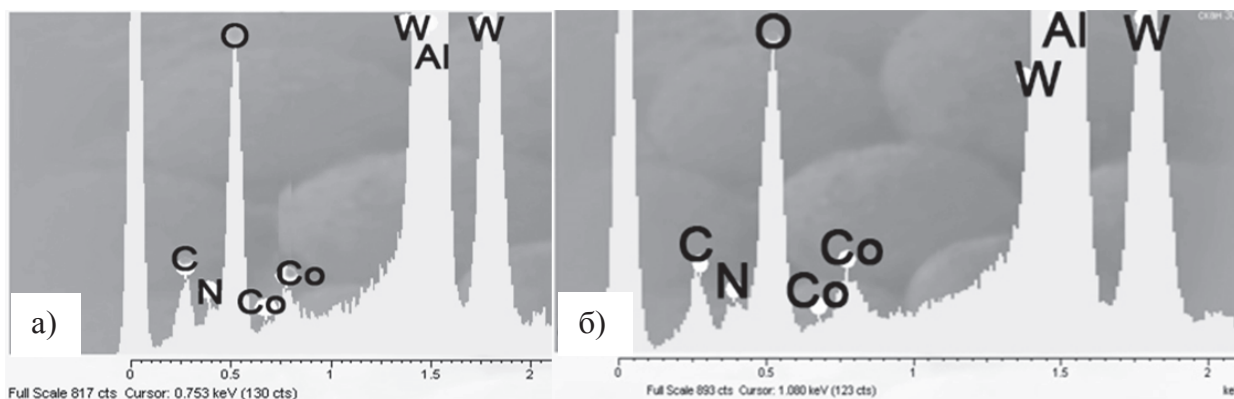


Рис. 3. Дифрактограммы ЛС Al/BK8 в двух местах заора проб:
а – по поверхности 75^х; б – по поверхности 300^х

Таблица 3

Изменение рентгенофазового состава покрытия Al/ВК8 при нагреве до 1000 °С

Температура, °С	Материал	Сингония	Интенсивность
25	Al	Кубическая	27
	γ -Al ₂ O ₃	Кубическая	14
	Co	Кубическая	14
	WN	Гексагональная	14
200	WC	Гексагональная	21
	WN	Гексагональная	16
	γ -Al ₂ O ₃	Кубическая	11
	Al ₂ (WO ₄) ₃	Ортогональная	11
350 (2 ч)	WC	Гексагональная	18
	δ -Al ₂ O ₃	Тетрагональная	10
	γ -Al ₂ O ₃	Кубическая	10
	Co	Кубическая	9
400 (2 ч)	WN	Гексагональная	29
	γ -Al ₂ O ₃	Кубическая	15
	Al	Кубическая	15
1000	γ -Al ₂ O ₃	Кубическая	13
	WC	Гексагональная	7

Из табл. 3 видно, что ЛС содержит жаростойкие соединения корунда в виде следующих фаз: γ -Al₂O₃ с кубической сингонией и δ -Al₂O₃ с тетрагональной сингонией, а также нитрид вольфрама WN с гексагональной решёткой, т.е. жаростойкие материалы, интенсивность пиков которых не ослабевает даже при нагреве до 1000 °С.

Выводы

1. Вследствие нагрева ВТС на воздухе в диапазоне рабочих температур 650...1000 °С, сопровождающегося интенсивным хрупким наростом окалины, необходимо формирование на его поверхности защитного ЛС.

2. Жаростойкость ВТС и его компонентов повышается в ряду ВК3 → ВК6 → ВК8 → WC → Т5К10 → ТТ10К8 → ВК8ИМ → Т15К6 → Т30К4 → W → Co → TiC.

3. Жаростойкость ВТС может быть значительно повышена применением ЭИЛ-покрытия материалами Al, Ti, TiN.

4. При ЭИЛ Al/ВК8 в ЛС формируются жаростойкие соединения корунда в виде фаз γ -Al₂O₃ с кубической сингонией и δ -Al₂O₃ с тетрагональной сингонией, а также нитрид вольфрама WN с гексагональной решёткой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синтетические сверхтвёрдые материалы. В 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвёрдых материалов / под ред. Н. В. Новикова. – Киев: Наук. думка, 1986. – 280 с.
2. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
3. Востриков, Я. А. Исследование кинетики процесса эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании твердыми сплавами / Я. А. Востриков, В. М. Макиенко // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской науч.-практ. конф. творческой молодежи с международным участием, Хабаровск, 23-25 апреля 2014 г. В 2 т. Т. 1. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2014. – С. 14-20.
4. Конаков, А. В. Повышение работоспособности инструментальной керамики на основе исследований структуры, состава, свойств и механизмов разрушения и изнашивания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Конаков Александр Викторович. – Благовещенск, 1999. – 24 с.
5. Третьяков, В. И. Металлокерамические твёрдые сплавы / В. И. Третьяков. – М.: Металлургиздат, 1962. – 592 с.
6. Францевич, И. Н. Сверхтвёрдые материалы / И. Н. Францевич, Г. Г. Гнесин, А. В. Курдюмов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1980. – 296 с.



Ким В. А., Дмитриев Э. А., Кочетков М. С., Матвеев С. Е.
V. A. Kim, E. A. Dmitriev, M. S. Kochetkov, S. E. Matveev

ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖЕЛЕЗА-АРМКО

LASER HARDENING ARMCO IRON

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mtnm@knastu.ru.

Mr. Vladimir A. Kim – D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Eduard A. Dmitriev – D.Sc. in Engineering, Professor, Rector, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: rector@knastu.ru.

Кочетков Марк Сергеевич – магистр кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mtnm@knastu.ru.

Mr. Mark S. Kochetkov – Master, Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Матвеев Сергей Евгеньевич – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergkms_89@mail.ru.

Mr. Sergey E. Matveev – PhD Candidate, Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: sergkms_89@mail.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования взаимодействия лазерного излучения с железом-армко. Рассмотрены и применены оптимальные режимы лазерной обработки, обеспечивающие выполнение условий структурных превращений. Исследована микроструктура, сформированная из расплавленного слоя, структурные процессы при лазерной обработке. При выполнении работы использовалась компьютерная обработка изображений микроструктуры, позволившая количественно описать структурные превращения и оценить влияние отдельных структурных составляющих на упрочнение.

Summary. In article results the research of interaction of laser radiation with Armco iron. Are considered and are applied optimal modes of laser processing conditions to ensure structure transformations. The microstructure formed from the molten layer, structural processes in the laser treatment. When performing the work using computer image processing microstructure, which allowed a quantitative description of structure transformations and to assess the impact of individual structural components for hardening.

Ключевые слова: лазерное излучение, структурные превращения, упрочнение, микротвердость структуры.

Key words: laser radiation, structure transformations, hardening, microhardness of structure.

УДК 621.375.826

Введение

Упрочнение сталей и сплавов лазерным излучением происходит за счет комплекса структурных превращений, инициированных высококонцентрированным потоком энергии, включающих высокоскоростное оплавление, испарение и кристаллизацию, генерацию различных дефектов кристаллического строения, полиморфные превращения и рекристаллизацию. Синергетический характер развития указанных процессов зависит от режимов лазерного излучения, теплофизических и физико-механических свойств обрабатываемого материала, температуры нагрева, его градиента и скорости изменения, содержания углерода, других легирующих элементов и других факторов [1; 2].

Для оценки вклада отдельных механизмов в упрочнение сталей в качестве эталонного материала часто используют технически чистое железо и (или) железо-армко. Отсутствие закалочных процессов при термическом воздействии на этих материалы позволяет исследовать в чистом виде структурные механизмы упрочнения, в частности генерацию линейных дефектов кристаллического строения, развитие и миграцию внутренних границ раздела при полиморфных превращениях и рекристаллизации.

В статье приведены результаты исследования взаимодействия лазерного излучения с железом-армко. При выполнении работы использовалась компьютерная обработка изображений микроструктуры, позволившая количественно описать структурные превращения и оценить влияние отдельных структурных составляющих на упрочнение.

Методика исследования

Исследования проводились на образцах из железа-армко, химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав железа-армко

Элемент	Si	C	Cu	Mn	S	P
Содержание, %	0,25	0,025	0,28	0,28	0,025	0,02

Лазерную обработку осуществляли на установке LRS-300 инфракрасным излучением с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Режимы лазерной обработки определялись напряжением накачки квантрона U , длительностью импульса τ , диаметром пятна воздействия d и характером распределения интенсивности светового потока по сечению луча, а энергия излучения W измерялась специальным датчиком, встроенным в лазерную установку, с выводом значения энергии на монитор. Удельная энергия E и плотность мощности излучения B вычислялись по формулам

$$E = \frac{4W}{\pi d^2},$$

$$B = \frac{E}{\tau}.$$

Режимы лазерной обработки (табл. 2) обеспечивали условия структурных превращений, которые протекают в жидкофазной области и зоне термического влияния.

Таблица 2

Режимы лазерной обработки

$U, В$	$\tau, с$	$W, Дж$	$d, мм$	$E \cdot 10^2, Дж/см^2$	$B \cdot 10^5, Вт/см^2$
400	0,002	9,0	2,0	2,87	1,43
450	0,001	6,0	2,0	1,91	1,91
450	0,001	6,2	2,0	1,97	1,97
450	0,004	25,0	2,0	7,96	1,99
450	0,003	19,0	2,0	6,05	2,02
450	0,002	13,0	2,0	4,14	2,07

Травление металлографических шлифов осуществляли 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте. Изображения микроструктур получали на металлографическом микроскопе Nikon при увеличении 1000 крат. Микроструктура железа-армко в исходном состоянии приведена на рис. 1.

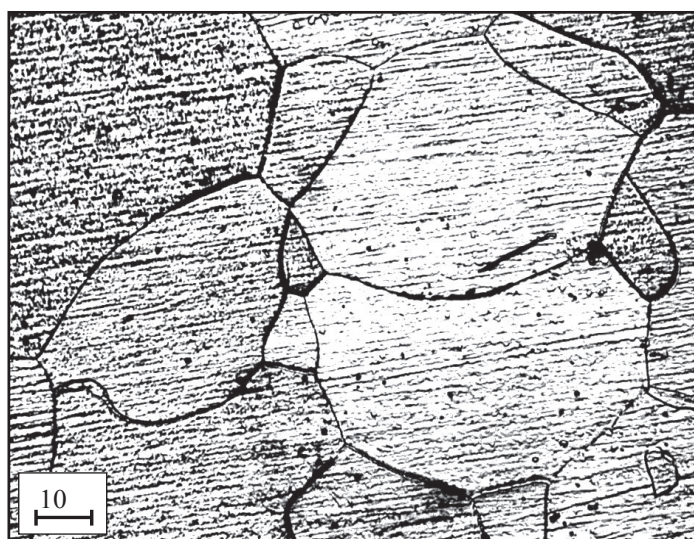


Рис. 1. Микроструктура железа-армко в исходном сыром состоянии (x1000)

Компьютерную обработку изображений производили с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1, которая предусматривала корректировку резкости, снятие контрастной маски, калибровку и выделение границ микроструктурных объектов [3]. В результате микроструктура преобразовывалась в «скелетированное» изображение, по которому вычислялись геометрические характеристики составляющих микроструктуры материала, такие как количество микроструктурных объектов на одной фотографии N , периметр P_i и площадь F_i каждого из них. По этим характеристикам рассчитывались количественные показатели структурной организации материала: удельный периметр границ $q_{уд}$ и плотность микроструктурных объектов n :

$$q_{уд} = \frac{\sum P_i}{F_{\phi}},$$

$$n = \frac{N}{F_{\phi}},$$

где F_{ϕ} – площадь металлографического шлифа, зафиксированная на изображении микроструктуры.

Развитость границ оценивалась фрактальной размерностью D , которая также определялась с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1. Микротвердость определялась с помощью микротвердомера НМV-2 при усилии на алмазную пирамиду 0,49 Н.

Результаты исследований и их анализ

Упрочнение поликристаллических материалов связывается с генерацией дислокаций и торможением их мобильной части различными структурными составляющими. Эффективными барьерами при скольжении дислокаций являются внутренние границы раздела в гетерогенных системах, которые сами по себе представляют активные источники генерации дислокаций при пластической деформации и высококонцентрированном энергетическом воздействии. Развитие новых границ при лазерной обработке включает несколько механизмов, функционирующих в различных структурно-энергетических условиях. В жидкофазной области или зоне оплавления образование границ зерен связывается процессами высокоскоростной кристаллизации, а в твердофазной – аллотропическими превращениями и рекристаллизацией [2].

Образование и развитие новых фаз и структур при полиморфных превращениях и рекристаллизации имеет некоторую схожесть с кристаллизацией. Процесс также включает образования первичных зародышей новой структуры и их рост, но реализуется в твердофазной системе (в отличие от кристаллизации), поэтому характеризуется более низкой скоростью и высокой инерционностью [5]. При лазерной обработке полиморфные превращения в сталях происходят дважды: в период нагрева и в период охлаждения. При нагреве до температур, превышающих температуры полиморфных превращений, в ферритной матрице образуются аустенитные зародыши, рост которых контролирует миграцию границ. Но вследствие высокой скорости нагрева и охлаждения этот процесс носит незавершенный характер, т.е. при охлаждении в момент прохождения температуры полиморфных превращений структура чистого железа будет состоять из феррита и аустенита. При дальнейшем снижении температуры ниже уровня полиморфных превращений только в аустенитных зернах образуются зародыши феррита и происходит их рост, а высокая скорость охлаждения также создает условия незавершенности этого превращения, при этом часть аустенитных зерен преобразуется в структуру видманштета. При высокоскоростном охлаждении материала после завершения лазерного импульса структурные превращения происходят в сильно неравновесных условиях. В результате лазерной обработки структура чистого железа в зоне термического влияния будет состоять из феррита, при этом одни зерна представляют остатки исходной структуры, а другие будут сформированы из аустенитной фазы. Первая группа зерен отличается большим размером по сравнению со второй. Образующиеся при этом внутренние границы раздела будут характеризоваться высокой развитостью по сравнению с исходной структурой.

Образование линейных и поверхностных дефектов кристаллического строения при лазерной обработке чистого железа связывается с ростом зародышей новой фазы, на границах которых с матрицей в процессе роста возникают высокие внутренние напряжения из-за разниц удельных объемов и упругих свойств кристаллических решеток. По мере миграции границ определенная часть дислокаций оказывается внутри растущих зерен, что оказывает свое влияние на упрочнение материала.

Процессы, протекающие в жидкофазной и твердофазной системах, по-разному проявляются в структурной организации материала. На рис. 2 приведены такие микроструктуры, в которых четко выявляются их структурные различия и границы раздела.

Микроструктура, сформированная из расплавленного слоя, определяется главным образом процессами, происходящими на стадии охлаждения. Высокая скорость нагрева и охлаждения при импульсном лазерном воздействии может создавать условия для незавершенности процесса оплавления. В результате в ванне расплава могут оставаться твердокристаллические фрагменты, которые просматриваются на изображениях окончательно сформир-

рованных микроструктур (рис. 3), а сама жидкая фаза сохраняет ближний атомарный порядок, близкий исходной твердофазной структуре. Твердокристаллические частицы, окруженные расплавом, создают тепловые стоки со своим локальным градиентом температур. Это приводит к формированию дендритов, ориентированных параллельно векторам градиентов температур, в результате чего образуются кластеры в форме звездочек.

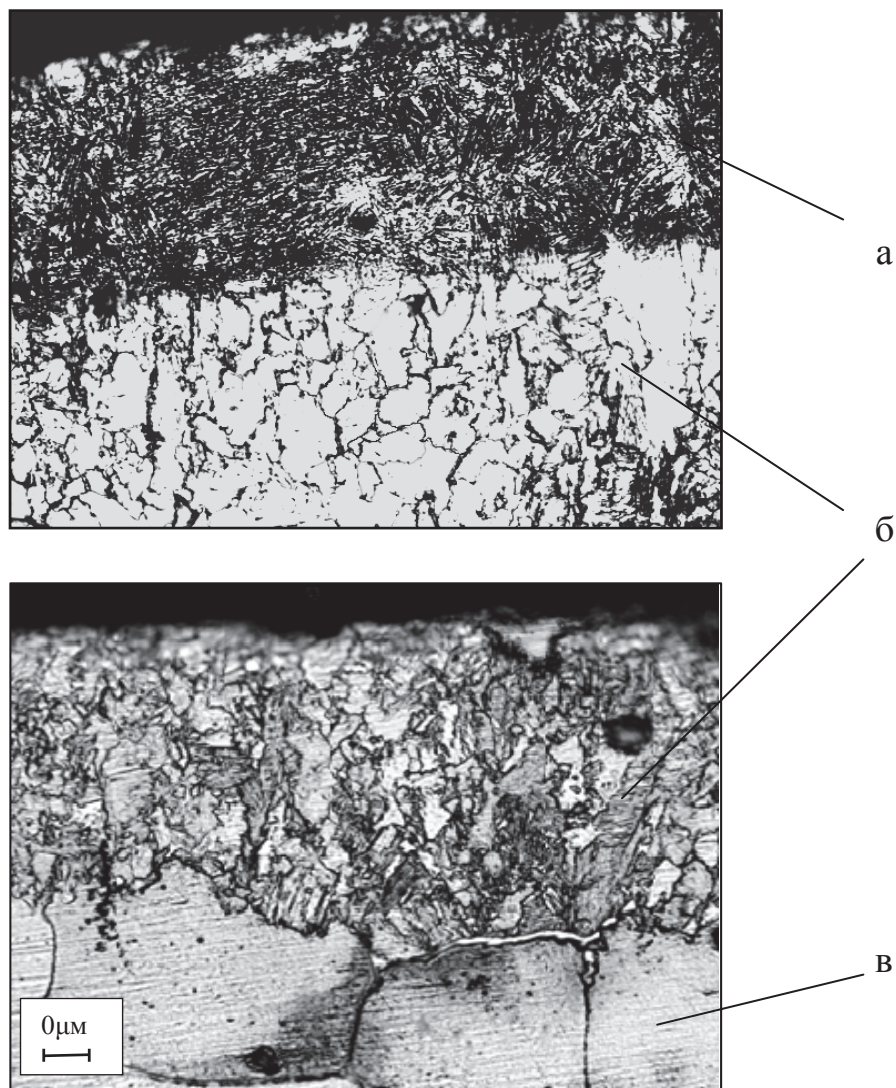


Рис. 2. Микроструктура железа-армка после лазерной обработки:
 а – зона, сформированная из жидкофазного состояния;
 б – зона термического влияния; в – исходная структура материала

Микроструктура, полученная из зоны оплавления, преимущественно состоит из отдельных упорядоченных дендритов первого порядка, ориентация которых зависит от направления градиента температуры при охлаждении и кристаллографической ориентации исходного зерна. Дендриты вблизи зоны термического влияния имеют игольчатую или овальную форму, а дендриты у самой поверхности – глобулярную. Дендриты, ориентированные в одном направлении, образуют кластеры с общей границей раздела, которая совпадает с границей исходного ферритного зерна.

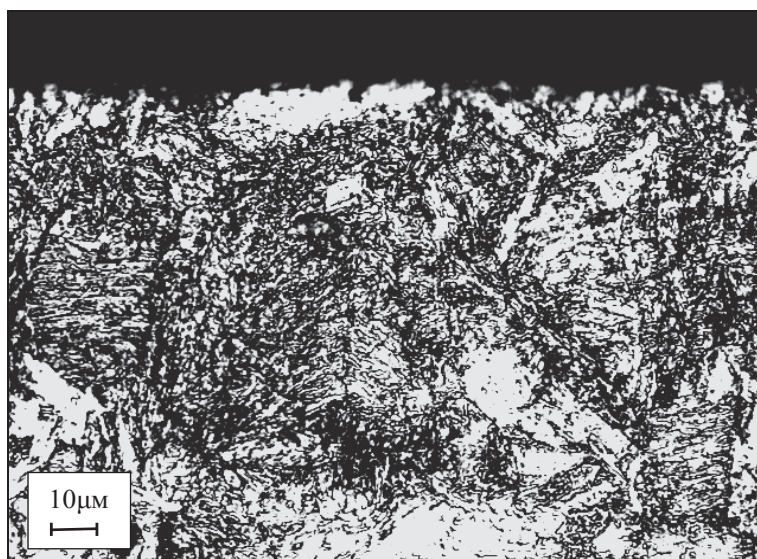


Рис. 3. Микроструктура, сформированная из расплавленного слоя, с твердокристаллическими включениями

Физико-механические свойства материала в значительной степени определяются состоянием и структурной организацией внутренних границ раздела. Количественные структурные показатели материала, такие как удельный периметр $q_{уд}$ и фрактальная размерность границ D , в большей степени характеризуют свойства поверхностных дефектов кристаллического строения. Внутренние границы раздела в гетерогенных материалах являются концентраторами напряжений микромасштабных уровней, активными источниками генерации дислокаций и барьерами для торможения мобильных дислокаций. Чем выше развитость внутренних границ, тем активнее процесс торможения скользящих дислокаций и эффективнее процесс упрочнения [4].

В табл. 3 приведены результаты измерения и расчета количественных показателей структурной организации различных типов структур, сформированных при лазерной обработке железа-армко. Анализ представленных результатов показывает, что микроструктура, сформированная в результате лазерного воздействия, отличается высокой степенью развитости внутренних границ раздела. Высокий удельный периметр границ, сформировавшихся в зоне оплавления, обеспечивается за счет большой плотности и меньшего размера микроструктурных объектов. Большие значения фрактальной размерности определяются не столько развитостью самих границ, сколько их повышенной кривизной за счет малых размеров микроструктурных объектов.

Таблица 3

Результаты компьютерной обработки изображений микроструктур

Тип структуры	Показатели структурной организации		
	$q_{уд}$, 1/мкм	n , 1/мкм ²	D
Исходная	0,0773 – 0,0792	0,0072 – 0,0123	1,1398 – 1,1678
Зона оплавления	1,0179 – 1,6528	0,4607 – 1,0342	1,2339 – 1,2756
Зона термического влияния	0,4306 – 0,8467	0,1166 – 0,3221	1,1808 – 1,2544

Высокий удельный периметр границ в зоне термического влияния определяется развитостью самих границ, имеющих локальные участки высокой кривизны, сложностью формы

зерен и их размерными различиями. Такая структурная организация материала характерна для гетерогенных систем с высокой плотностью дефектов кристаллического строения и концентраторов разных масштабных уровней [4].

На рис. 4, 5 приведены результаты исследования микротвердости структур, полученных лазерной обработкой железа-армко. Микротвердость структуры, сформированной из расплавленного слоя, почти в 1,5 раз превышает микротвердость зоны термического влияния. С повышением удельной энергии лазерного излучения микротвердость меняется по экстремальной зависимости, указывая на существование предельных режимов лазерной обработки, выше которых происходят процессы разупрочнения. Экстремальность зависимости микротвердости от энергии лазерного излучения характерна как для структур, сформировавшихся из расплавленного слоя, так и для зоны термического влияния, но более явно этот эффект просматривается у структур, сформированных из жидкофазного состояния.

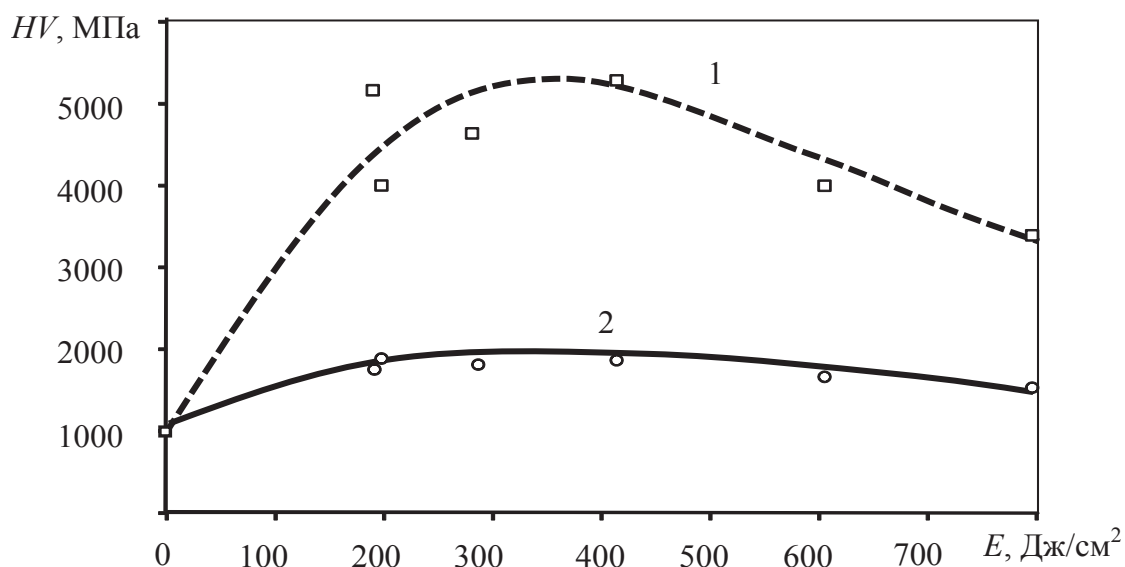


Рис. 4. Влияние удельной энергии лазерного излучения на твердость упрочненного слоя в зоне оплавления (1) и зоне термического влияния (2)

Характер зависимости микротвердости структуры, образованной при лазерной обработке, от удельного периметра границ подтверждает, что более развитые внутренние границы раздела создают больший эффект упрочнения. Эта закономерность носит обобщенный характер независимо от способа наведения границ раздела, но при этом четко выделяются две структурные области, полученные из жидкофазного и твердофазного исходного состояния материала.

Закключение

1. Железо-армко является уникальным металлическим материалом для исследования структурных превращений при лазерной обработке.

2. Структурные процессы при лазерной обработке развиваются по синергетическому алгоритму, который может быть описан с помощью количественных показателей структурной организации гетерогенных систем, определяемых методом компьютерной металлографии.

3. С повышением удельной энергии лазерного излучения упрочнение сформированной микроструктуры носит экстремальный характер независимо от состояния исходного материала (жидкофазное или твердофазное).

4. С повышением удельного периметра внутренних границ раздела микротвердость структуры, полученной лазерной обработкой, возрастает.

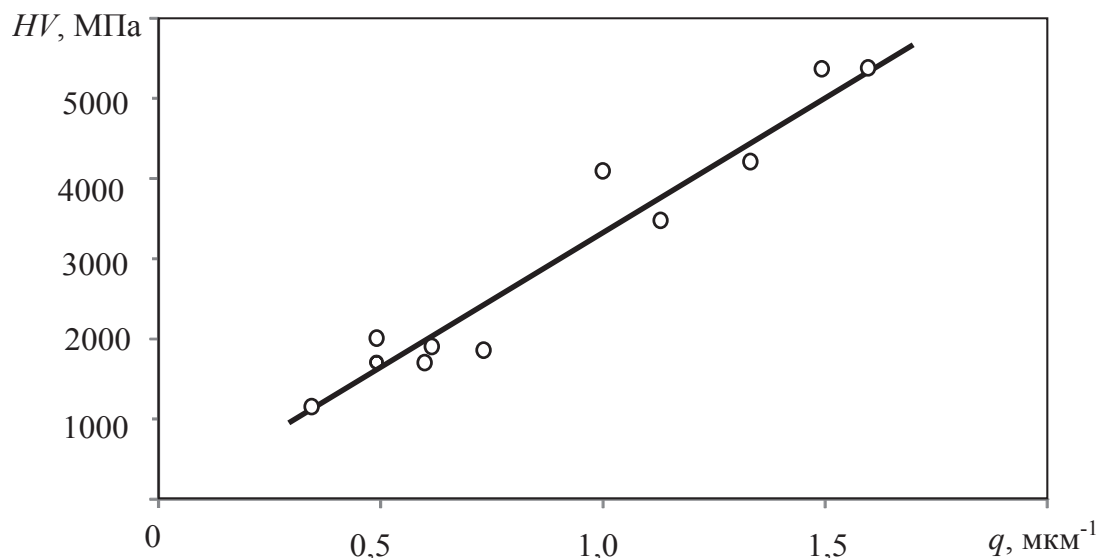


Рис. 5. Влияние удельной длины границ на микротвердость железа-армко, упрочненного лазерной обработкой

ЛИТЕРАТУРА

1. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 537 с.
2. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.
3. Количественная оценка зеренной структуры конструкционных сталей при пластической деформации и рекристаллизационном отпуске / В. А. Ким, В. В. Лиманкин, Б. Н. Марьин [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1(10). – С. 83-88.
4. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]; отв. ред. В. Е. Панин. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2006. – 520 с.
5. Физическое материаловедение. В 3 т. Т. 1. Атомное строение металлов и сплавов / под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена. – 3-е изд. перераб. и доп.; пер с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 640 с.
6. Галенко, П. К. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности / П. К. Галенко, Е. В. Харанжевский, Д. А. Данилов // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – Вып. 5. – С. 48-55.



Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.
A. D. Verkhoturou, A. I. Yevstigneev, N. S. Andrianova

**ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ
СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ELECTROSLAG REMELTING, AS A METHOD OF RECYCLING
OF SOLNECHNY MINING AND PROCESSING ENTERPRISES MINING WASTES
AND PRODUCTION OF NEW ELECTRODE MATERIALS**

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 40; тел.: 89098506891. E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturou – Dr. habil. of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 40, Kim Yu Cheng Str., Khabarovsk, 680021, Russia; tel.: 89098506891. E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Yevstigneev – D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Андрианова Надежда Сергеевна – аспирантка кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; тел.: 8(924) 2262972. E-mail: andrianova.nc@ya.ru.

Ms. Nadezda S. Andrianova – graduate student «Railway rolling stock», the Far East State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk, Serysheva st., 47; tel.: 8(924) 2262972. E-mail: andrianova.nc@ya.ru.

Аннотация. Произведена переработка отходов Солнечной центрально-обогажительной фабрики (ЦОФ) и минерального сырья с артели старателей «Амур» методом электрошлакового переплава. Показан сравнительный анализ минерального сырья и отходов в использовании новых материалов как электродов для электроискрового легирования. Приведены результаты электроискрового легирования полученными электродными материалами для стали 45, титанового и твердого сплавов.

Summary. Produced recycling of Solnechny mining and processing plant mining wastes and mineral raw materials from Artel «Amur» using electros slag remelting method. Comparative analysis of mineral raw materials and waste in the use of new materials such as electrodes for electro-spark is shown. The results of the electric spark alloying for 45 steel, titanium alloys and hard alloy obtained electrode materials.

Ключевые слова: переработка отходов горного производства, электрошлаковый переплав, сплавы, электроды, электроискровое легирование.

Key words: recycling of mining wastes, electros slag remelting, alloys, electrodes, electro-spark alloying.

УДК 621.763: 621.9.048.4

Введение

Проблема использования отходов минерального сырья в настоящее время является особенно актуальной для Дальневосточного региона, где горнодобывающие предприятия (как действующие, так и законсервированные) хранят значительные объемы таких отходов, которые представляют экологическую опасность для окружающей среды.

В Комсомольском районе с 1969 по 2003 гг. активно разрабатывались оловянные месторождения, что привело к образованию горнопромышленной техногенной системы, состоящей из многочисленных горных выработок, карьеров и трех хвостохранилищ, где складированы отходы двух горно-обогачительных фабрик (рис. 1) [1].

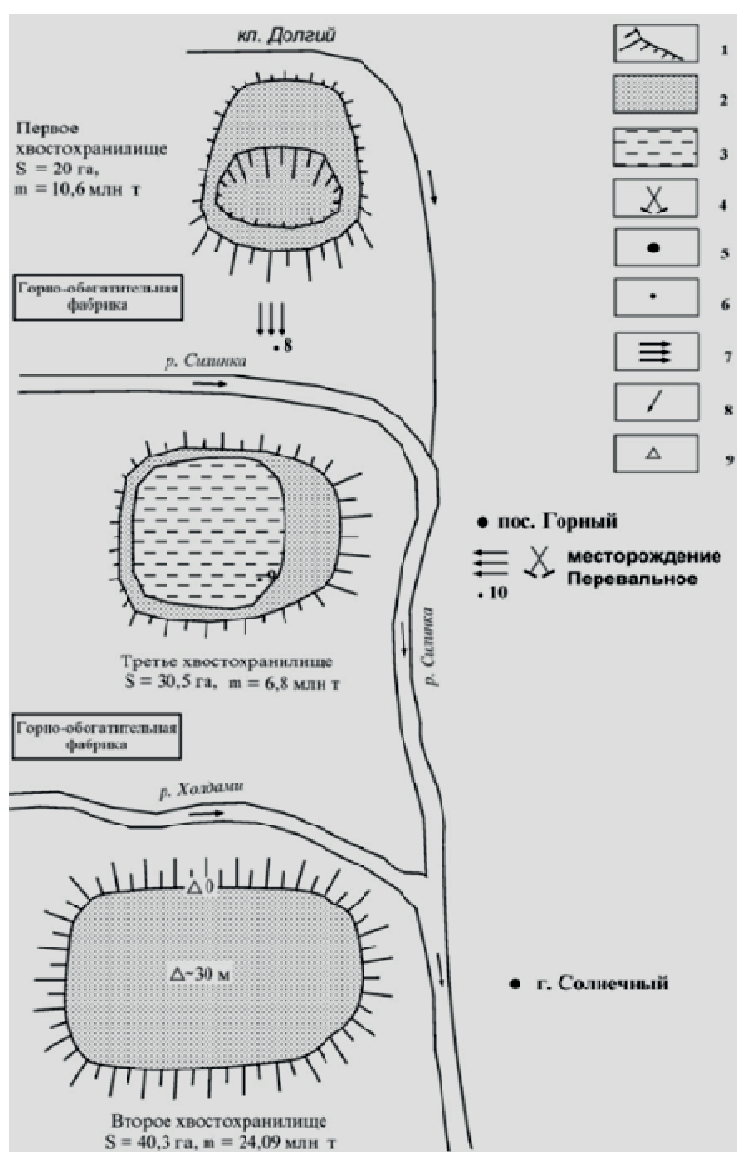


Рис. 1. Схема расположения хвостохранилищ в Комсомольском районе:

- 1 – контур хвостохранилища; 2 – сухие хвосты; 3 – шламовые воды;
- 4 – закрытая штольня; 5 – населенный пункт; 6 – точка отбора гидрохимической пробы;
- 7 – дренажный сток шламохранилища или рудничных вод;
- 8 – направление течения водотока; 9 – относительная отметка высоты [1]

Объем отходов в хвостохранилище (см. рис. 1) составляет 32 млн т. Специфичность данного техногенного объекта заключается в наличии широкого спектра токсичных химических элементов, которые присутствуют в составе руд, техногенных образований (отходов) и околорудных ореолов и обнаружены не только в сточных водах, но и в почвогрунтах, растительности, донных отложениях, водных объектах [2; 3]. Выявлено, что необратимые изменения в окружающей среде связаны с миграцией токсичных химических элементов из горно-промышленных отходов в экосистемы. В составе отходов имеются следующие токсичные химические элементы: олово, медь, цинк, мышьяк, сера, кадмий, кобальт, никель, хром и др. Исследованиями установлено очень высокое содержание сульфидной серы, общий объем которой в хвостохранилище составляет 21 тыс. т при среднем её содержании 2,16 %, а также железа – 353 тыс. т [4]. Характерная геохимическая особенность «хвостов» – высокие концентрации в них меди (4461,8 г/т), мышьяка (2421 г/т), свинца (1475,8 г/т) и других тяжелых металлов [5].

Для разрешения экологической обстановки предлагается перерабатывать отходы и сырье для создания новых электродных материалов. Известны работы в области минералогии о получении материалов из минерального сырья (Макиенко В. М., Бабенко Э. Г., Химухин С. Н., Николенко С. В., Шпилёв А. М., Ершова Т. Б., Евстигнеев А. И.) [6], однако работ о получении материалов из отходов горного производства с использованием концентрированных потоков энергии в литературе практически не имеется.

Особенности переработки отходов минерального сырья определяется, прежде всего, их химическим составом. В связи с тем, что отходы Солнечного горно-обогатительного комбината (ГОК) содержат преимущественно железо, решение проблемы предложено осуществлять посредством выполнения ряда этапов:

- 1) получение «чистого» железа переплавом на электрошлаковой установке с использованием железного электрода;
- 2) исследование полученного материала с практическим его использованием, например, в качестве электродов для электроискрового легирования;
- 3) получение легированных быстрорежущих сталей с совместным переплавом на электрошлаковой установке с использованием (кроме отходов) таких элементов, как вольфрам, цирконий, бор, содержащих минеральное сырье, а так же графит;
- 4) исследование полученных материалов.

В связи с этим целью настоящей работы являлось получение металлических композиционных материалов и возможности их использования в качестве электродных материалов для электроискрового легирования.

Методология, материал, оборудование

Исследования проводились по разработанной блок-схеме (рис. 2) с помощью литературы [7].

Для сравнения результатов экспериментов использовалось золотосодержащее сырье с артели старателей «Амур» и пробы с Центральной обогатительной фабрики ЦОФ Солнечного ГОК.

Получены новые материалы из отходов и сырья, в которых использовался флюс АН-22, проволока Св-08г2с и три вида проб в виде измельченного песка.

Был проведен химический анализ состава отходов и сырья, представленный на рис. 3, 4, 5.

Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.
ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

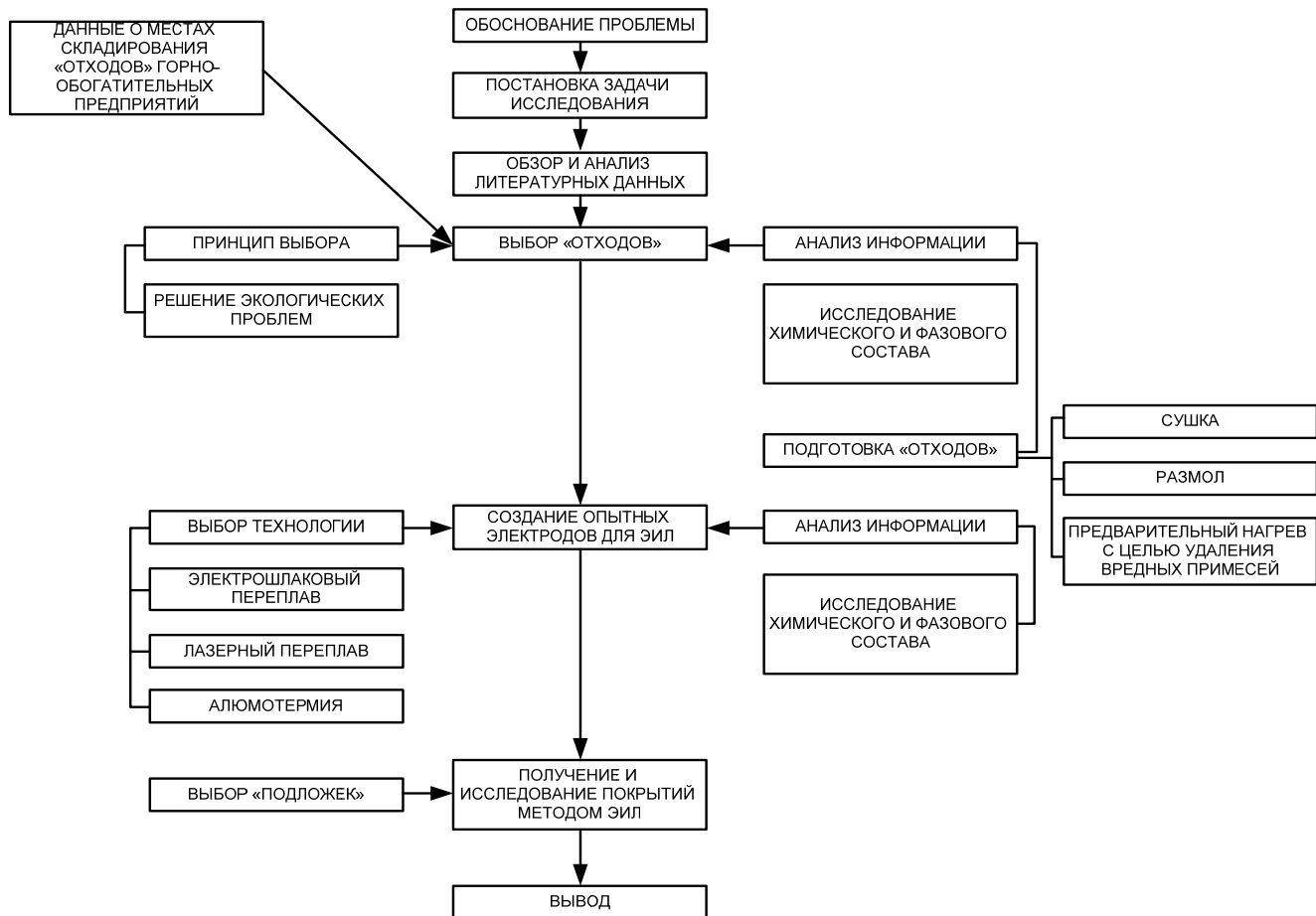


Рис. 2. Блок-схема для создания новых электродных материалов для электрошлакового легирования

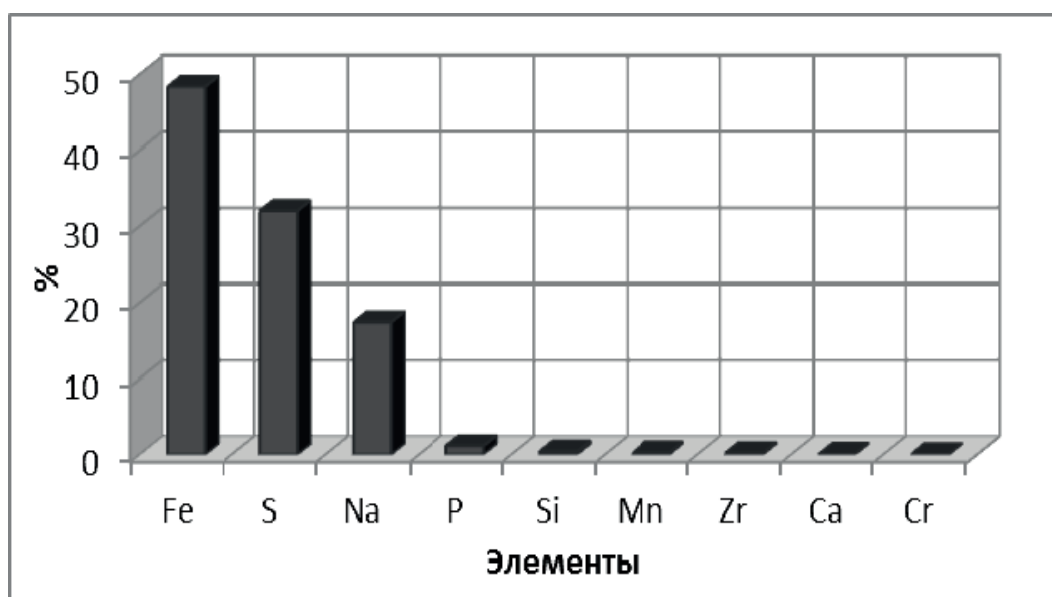


Рис. 3. Химический анализ пробы № 1 из Центральной обогатительной фабрики Солнечного ГОК

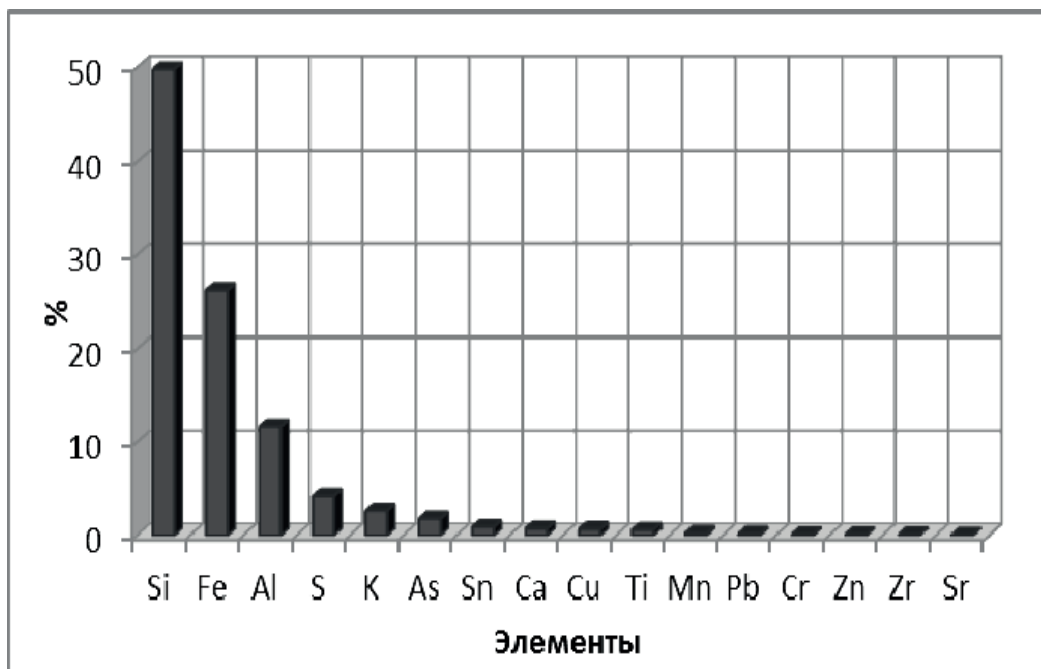


Рис. 4. Химический анализ пробы № 2 из Центральной обогатительной фабрики Солнечного ГОК

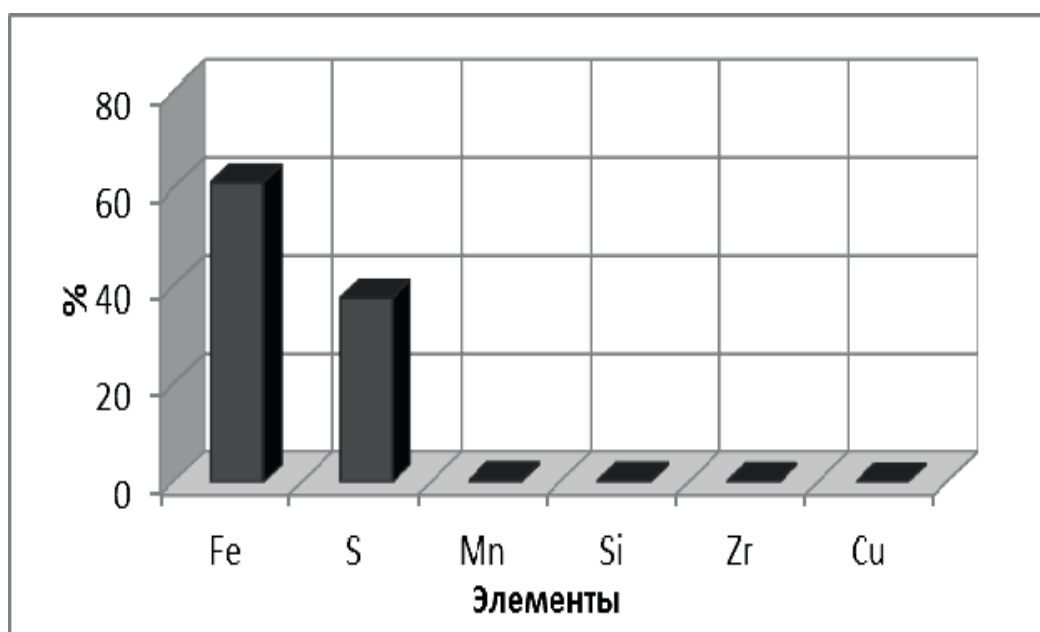


Рис. 5. Химический анализ минерального сырья артели старателей «Амур»

Как следует из результатов химического анализа, все пробы содержат вредные примеси (S, As), для их вычленения необходимо перед переработкой предварительно прокалить сырье при температуре 500 °С не менее четырех часов.

Переработка отходов производилась электрошлаковой установкой, разработанной в Дальневосточном государственном университете путей сообщения (рис. 6).

Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рис. 6. Установка для электрошлакового переплава

Переплав осуществлялся в следующих режимах: $I = 200 \dots 250$ А, $U = 40$ В, напряжение в сети 380 В.

Для электрошлакового переплава использовались 200 г флюса АН-22, проволока Св-08г2с и отходы по каждому виду проб (50, 100, 150 г). Один метр проволоки переплавлялся за 40...60 с. Время, затраченное на переплав одного образца, составляло 4...5 мин.

Результаты и обсуждения

Всего были получены девять заготовок с размерами 80...90 мм; диаметром 40...50 мм и массой 700...950 г. На рис. 7 показан образец без удаления шлака.

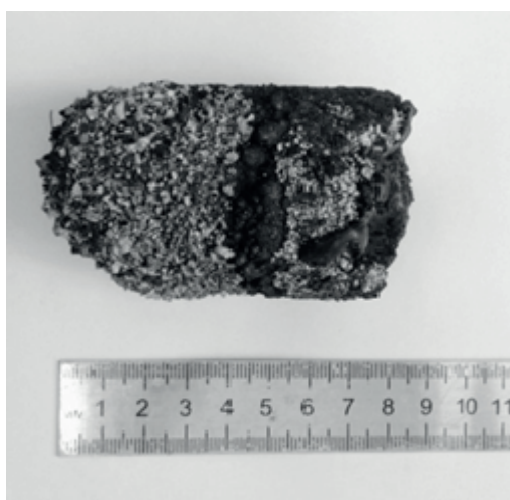


Рис. 7. Образец, изготовленный на электрошлаковой установке без удаления шлака

Химический анализ слитка с содержанием сырья показал наличие Fe – 98,335 %; S – 0,810 %; Mn – 0,505 %; Si – 0,258 %; Cu – 0,092 %. Слитки, имеющие в составе отходы Солнечной ЦОФ, показаны на рис. 8, где видно, что основной материал этих слитков, – железо, как и для слитков с добавлением сырья (рис. 9).

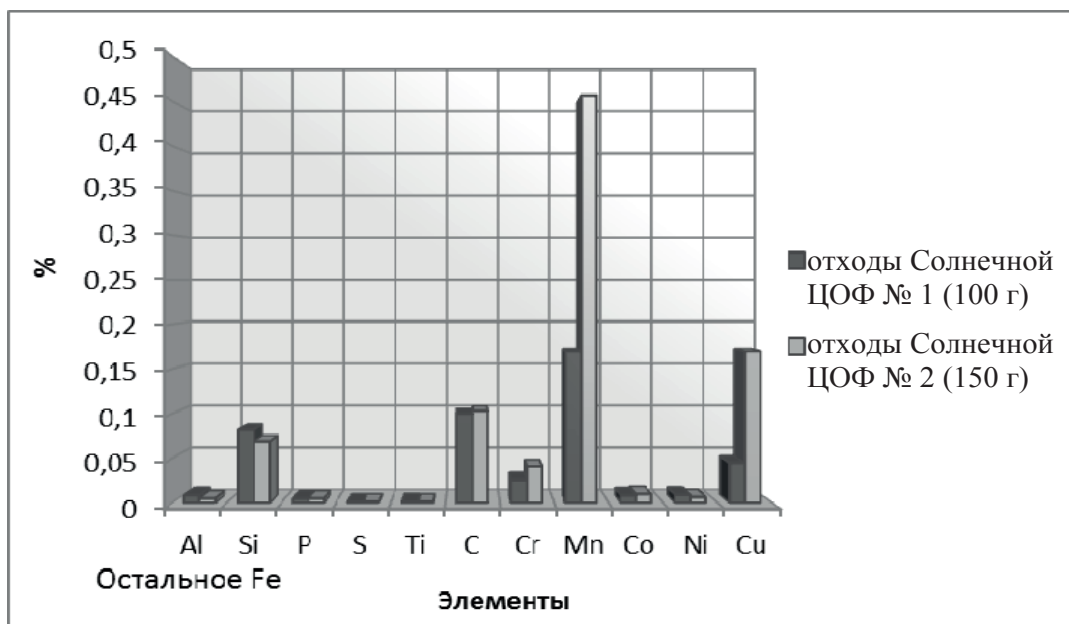


Рис. 8. Химический состав слитков с добавлением отходов Солнечной ЦОФ

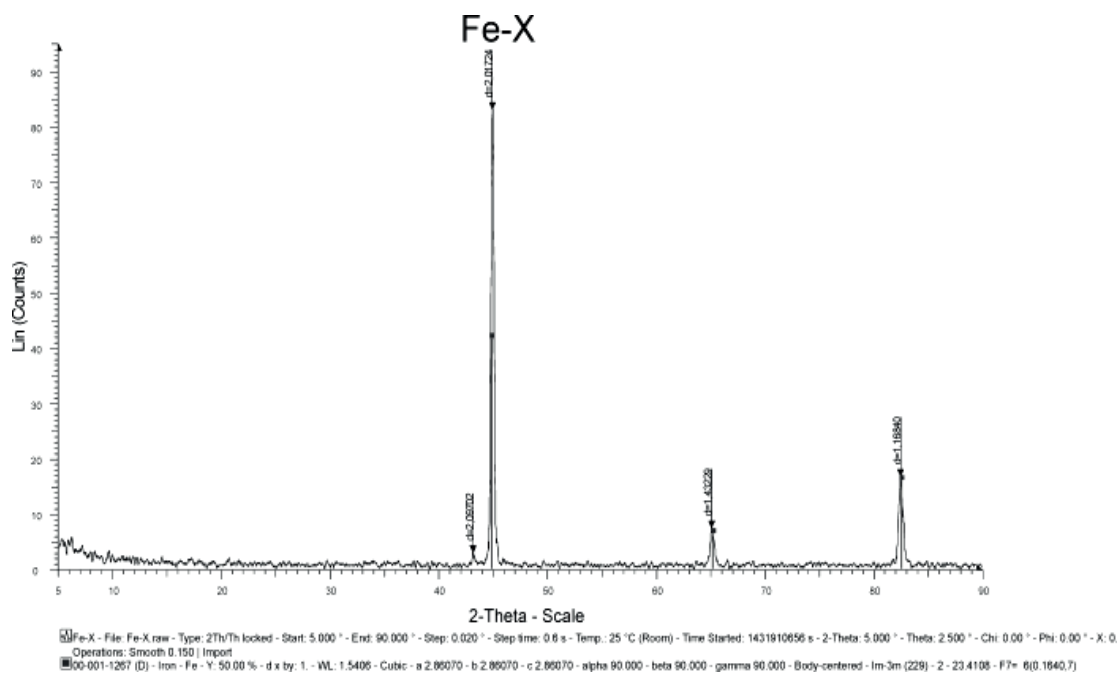


Рис. 9. Фазовый анализ материала, содержащего 150 г сырья с артели старателей «Амур», флюс АН-22 и проволоки Св-08г2с

На рис. 10 показаны микроструктуры девяти слитков, по которым видно явное различие в зависимости от состава, а так же их неоднородность. Все слитки названы по главному отличительному компоненту: сырье с артели старателей «Амур», отходы Солнечной Ц.О.Ф. № 1, отходы Солнечной ЦОФ № 2. По микроструктуре материалов полученных из минерального сырья с артели старателей «Амур» (150 г), отходов Солнечной ЦОФ № 2 (100 г) и отходов Солнечной ЦОФ № 2 (150 г) наблюдаются поры. Очевидно, что это связано с выделением серы при их переработке.

Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

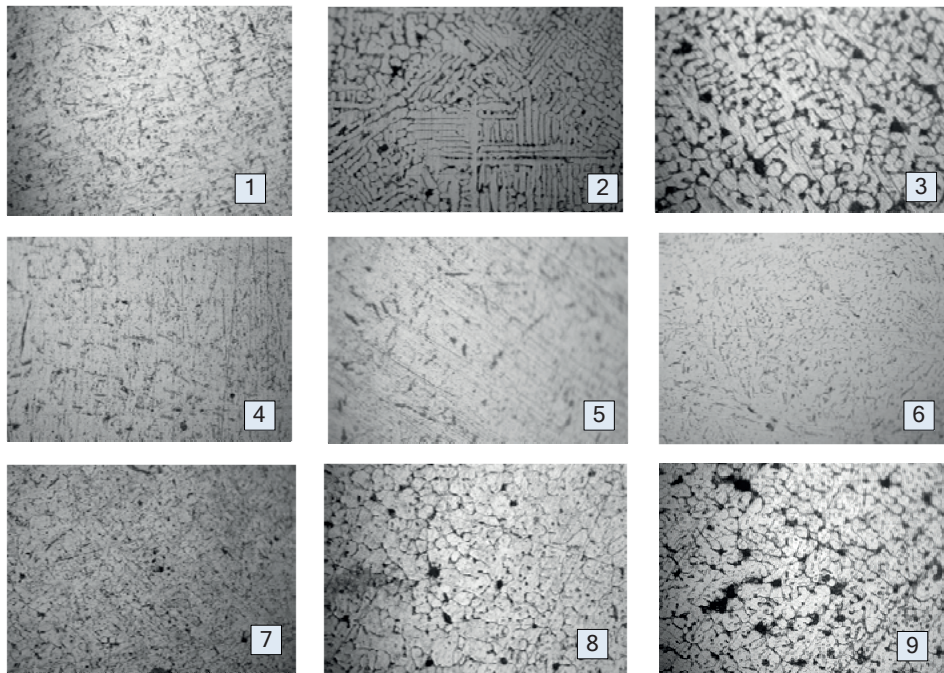


Рис. 10. Микроструктура слитков (увеличение x200):

- 1 – сырье с артели старателей «Амур» (50 г); 2 – сырье с артели старателей «Амур» (100 г);
3 – сырье с артели старателей «Амур» (150 г); 4 – отходы Солнечной ЦОФ № 1 (50 г);
5 – отходы Солнечной ЦОФ № 1 (100 г); 6 – отходы Солнечной ЦОФ № 1 (150 г);
7 – отходы Солнечной ЦОФ № 2 (50 г); 8 – отходы Солнечной ЦОФ № 2 (100 г);
9 – отходы Солнечной ЦОФ № 2 (150 г)

На рис. 11 показана микротвёрдость образцов, по результатам исследования которых выявлено, что слиток, содержащий сырье с артели старателей «Амур», тверже, чем образцы, содержащие отходы Солнечной ЦОФ.

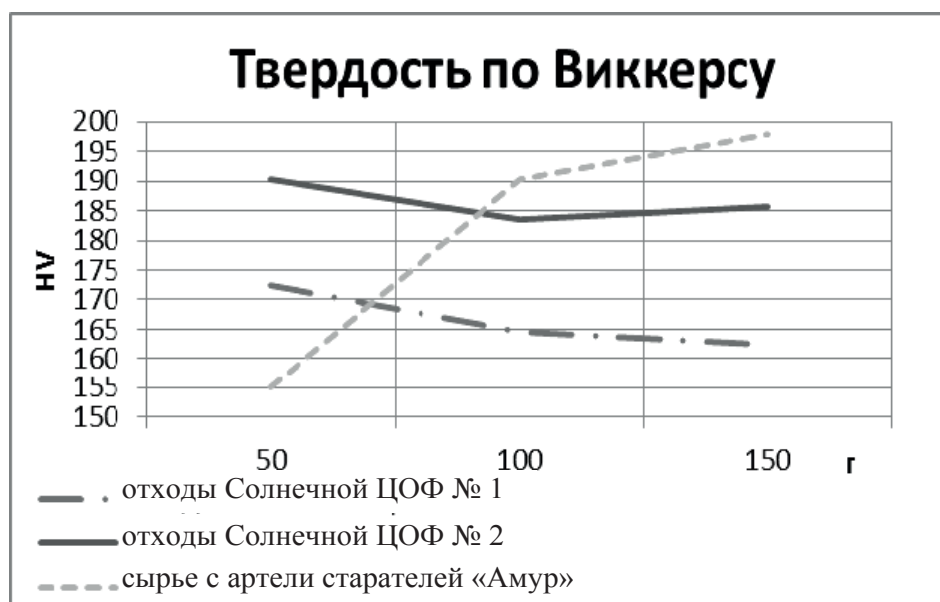


Рис. 11. Микротвёрдость девяти слитков

Данный материал был использован в качестве электрода для электроискрового легирования твердых сплавов, титанового сплава и стали 45 на установке «Корона 1101». На рис. 12 показана кинетика массопереноса электрода, содержащего 150 г минерального сырья с артели старателей «Амур», и катода ВК-8. Состав легированного слоя представлен на рис. 13, а его фрактограмма – на рис. 14.

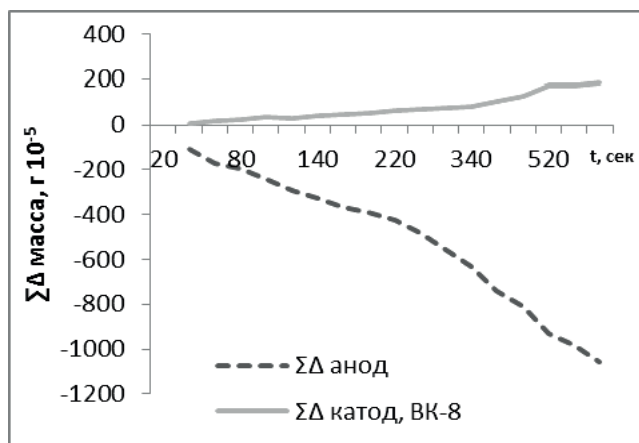


Рис. 12. Кинетика суммарного изменения массы катода (ВК-8) и анода (сырье с артели старателей «Амур» (150 г))

Как видно, при электроискровом легировании наблюдается непрерывное повышение массы катода ВК-8. Легированный слой состоит из Fe, Mn, W, т.е. происходит взаимодействие материала анода и катода в процессе формирования легированного слоя (см. рис. 13), однако наблюдаются малые значения коэффициента переноса (17 %).

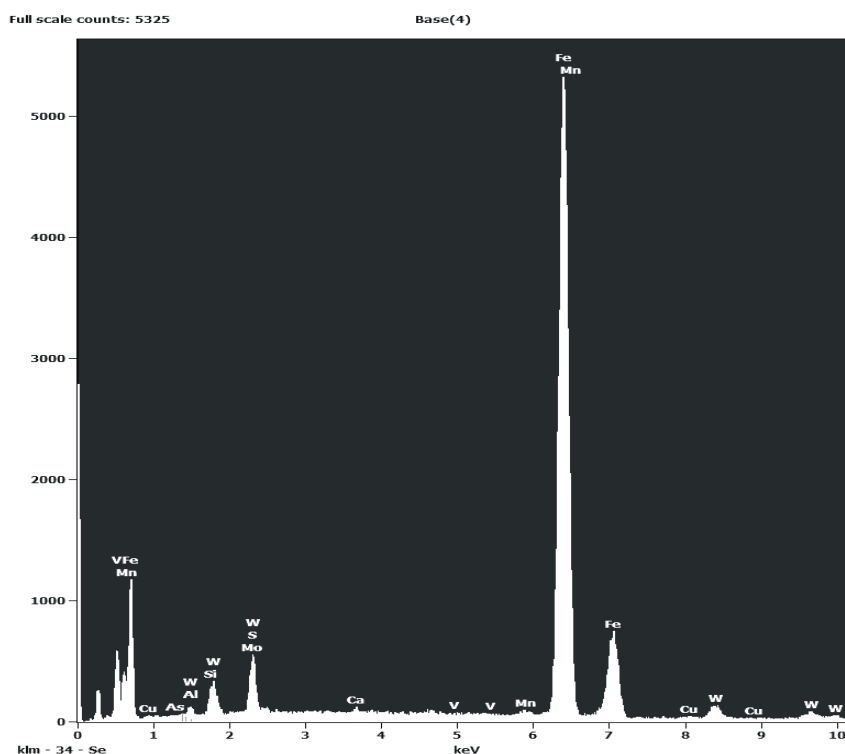


Рис. 13. Химический состав легированного слоя на твердом сплаве ВК-8

Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На поверхности катода наблюдаются участки взаимодействия материала электрода в процессе их контакта на фоне расплавленного материала (см. рис. 14).

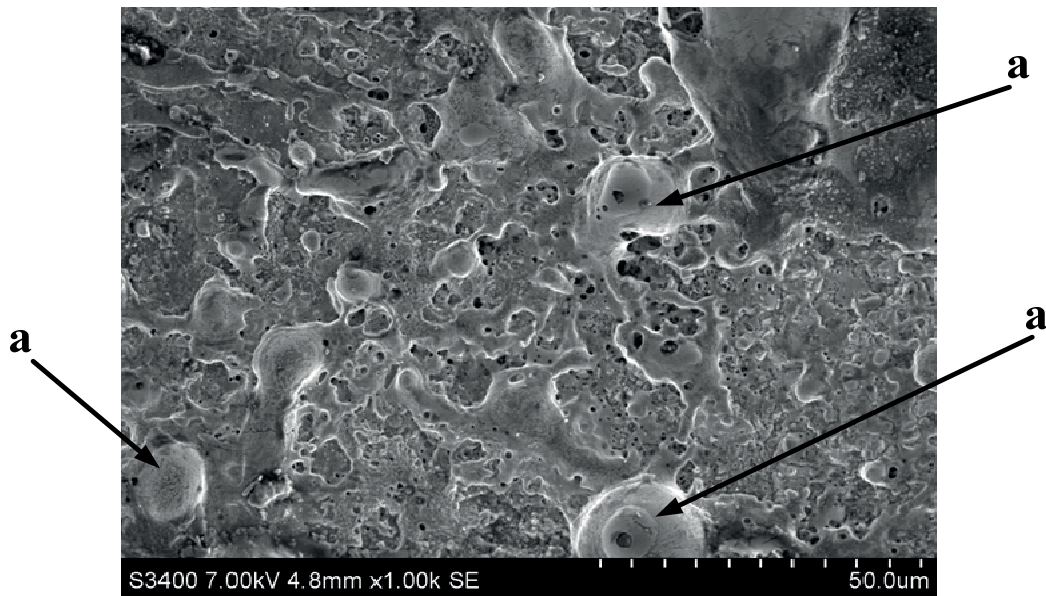


Рис. 14. Фрактограмма легированного слоя ВК-8: а – участок контакта электрода

На рис. 15 показана кинетика массопереноса анода (отходы Солнечной ЦОФ № 1) и катода (ВК-3). На рис. 16 видно, что в процессе электроискрового легирования наблюдается непрерывное снижение массы катода, что показывает неэффективность использования полученных материалов с большим содержанием серы.

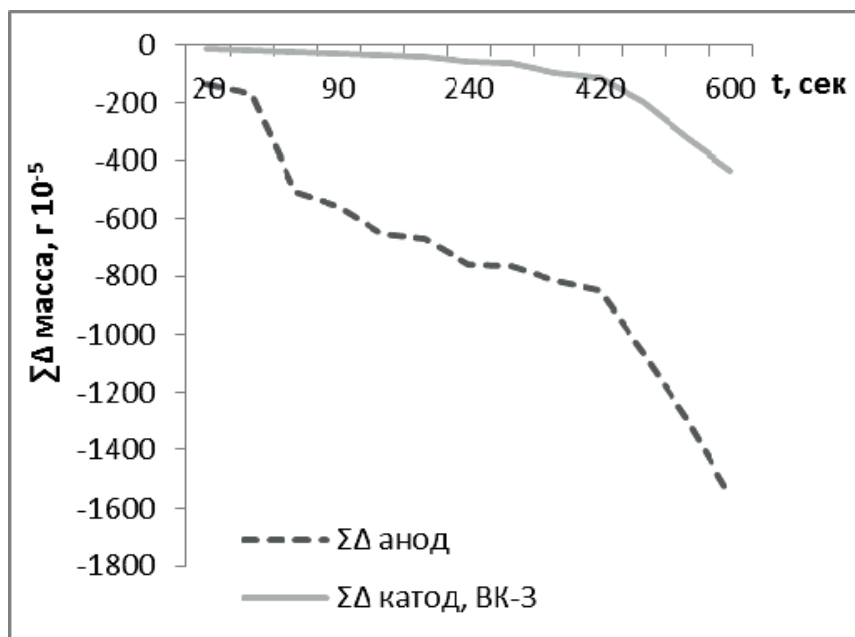


Рис. 15. Кинетика суммарного изменения массы катода (ВК-3) и анода (отходы Солнечной ЦОФ № 1 (150 г))

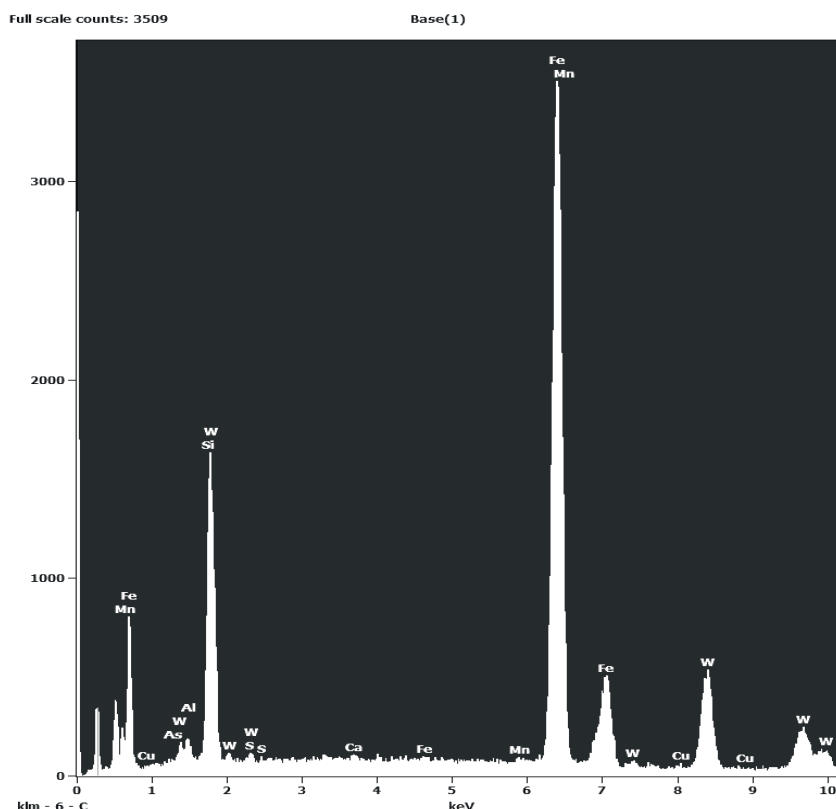


Рис. 16. Химический состав легированного слоя на твердом сплаве ВК-3

При сравнении результатов легирования на твердом сплаве выявлено, что положительный привес происходит при легировании анодом, содержащим минеральное сырье.

Также было произведено легирование на стали 45 и титановом сплаве анодом (отходы Солнечной ЦОФ № 1, № 2) (рис. 17, 18). Химический состав легированного слоя на стали выявил Fe – 62,4 %; Na – 29,2 %, а также менее 1 % Al, S, Si, P, Co, Zn, Sn, Sb, Cu, Ni, Mn. Слой на титановом сплаве состоит из Fe – 74,6 %; Al – 3,87 %; Ti – 13,5 %; а также менее 1 % Si, P, S, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Ca.



Рис. 17. Кинетика суммарного изменения массы анода (отходы Солнечной ЦОФ № 1 (150 г)) и катода (титановый сплав)

Верхотуров А. Д., Евстигнеев А. И., Андрианова Н. С.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ КАК МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СОЛНЕЧНОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При электроискровом легировании стали также наблюдается непрерывное повышение массы катода, однако коэффициент переноса не превышает 25 %.

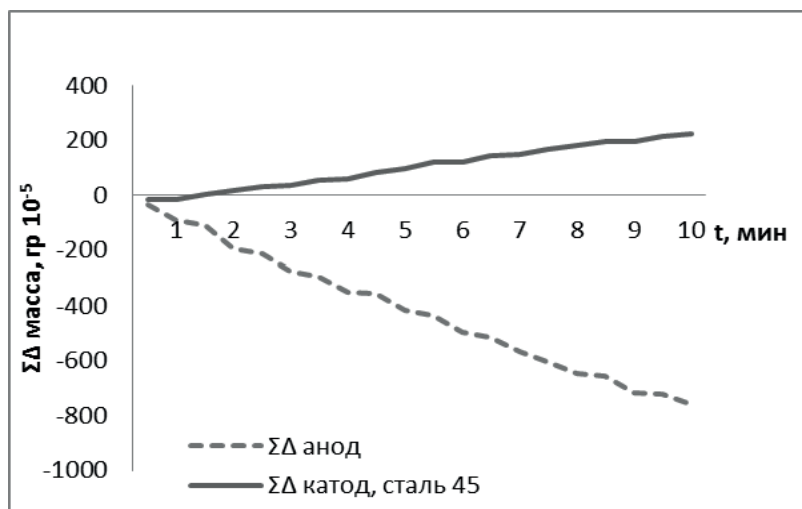


Рис. 18. Кинетика суммарного изменения массы анода (отходы Солнечной ЦОФ № 2 (150 г)) и катода (сталь 45)

При электроискровом легировании титана с $t_{уд} = 5 \dots 6$ мин/см² также наблюдается повышение массы катода, далее происходит стабилизация процесса, однако коэффициент переноса не превышает 5 %.

В процессе легирования зафиксирована шероховатость измененного слоя на стали 45 профилометром TR200, результат отображен на рис. 19.

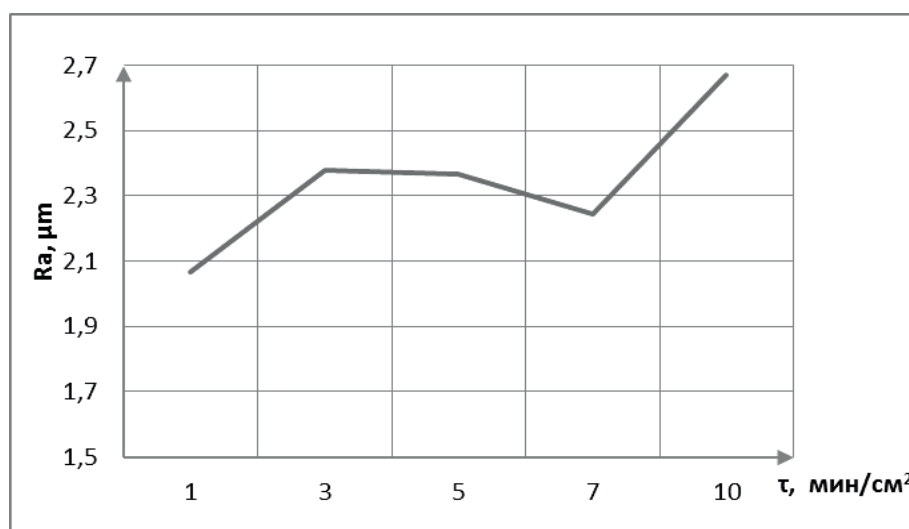


Рис. 19. Шероховатость покрытия во время легирования для стали 45 (анод – отходы Солнечной ЦОФ № 2)

Шероховатость в процессе электроискрового легирования при $t = 3$ мин/см² непрерывно повышается, а затем ее значения стабилизируются при $t_{уд} = 3 \dots 7$ мин/см², при повышении $t_{уд}$ наблюдается значительное повышение шероховатости. Твердость легированного слоя составляет 360 HV по Виккерсу, когда твердость стали равна 168 HV.



Выводы

1. Предложена переработка отходов Солнечного ГОК как для устранения техногенного загрязнения, так и для создания нового перспективного материала для электроискрового легирования.
2. Методом электрошлакового переплава получен новый материал, который использовался в качестве электрода для электроискрового легирования стали 45, титанового и твердого сплавов.
3. Новые электродные материалы из минерального сырья и отходов представляют практическое значение для упрочнения металлических поверхностей рабочих деталей.
4. Для повышения коэффициента переноса необходимо применить при электрошлаковом переплаве минеральное сырье, содержащее W, V, Zr, Ti, а также полностью удалить вредные примеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвостохранилища Комсомольского оловорудного района: неостребованные минеральные ресурсы и угроза для экологической обстановки / А. И. Ханачук, В. П. Зверева, Р. А. Кемкина [и др.] // Вестник ДВО РАН. – 2011. – № 3. – С. 77-82.
2. Мамаев, Ю. А. Регулирующее воздействие биоты на окружающую природную среду и проблема организации биологических исследований в пределах природно-горнотехнических систем / Ю. А. Мамаев, Л. Т. Крупская, Б. Г. Саксин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 3. – С. 137-141.
3. Особенности миграции токсичных химических элементов в компонентах природной среды в зоне влияния хвостохранилища ЦОФ ОАО «Солнечный ГОК» / Л. Т. Крупская [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 4. – С. 349-361.
4. Минералого-геохимическое обоснование переработки лежалых песков хвостохранилищ Солнечного ГОК (Комсомольский район, Хабаровский край) / А. И. Харчук [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Наука о земле. – 2012. – № 1(19). – С. 22-40.
5. Шек, В. М. Использование геоинформационных технологий при обеспечении экологической безопасности биоты (на примере «Солнечный ГОК») / В. М. Шек, А. В. Крупский, Л. Т. Крупская // Экология промышленного производства. – 2011. – № 1. – С. 22-24.
6. Получение новых материалов в Дальневосточном регионе: моногр. В 2 ч. Ч. 1. / под ред. А. Д. Верхотурова. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2013. – 293 с.
7. Верхотуров, А. Д. Методология создания сварочных материалов: моногр. / А. Д. Верхотуров, Э. Г. Бабенко, В. М. Макиенко; под ред. Б. А. Воронова. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2009. – 128 с.

Козин В. М., Верещагин В. Ю., Верещагина А. С.
V. M. Kozin, V. Y. Vereshchagin, A. S. Vereshchagina

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛЕДОРАЗРУШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН**

**CRITERIA FOR ASSESSING THE ABILITY OF ICE-BREAKING
FLEXURAL-GRAVITY WAVES**

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформирования Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Kozinvictor@imim.ru.

Mr. Viktor M. Kozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory of the Institute of Mechanics of deformation Engineering and Metallurgy, FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Kozinvictor@imim.ru.

Верещагин Владислав Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Информационной безопасности, информационных систем и физики» Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Klirickv@gmail.com.

Mr. Vladislav Y. Vereshchagin – Senior Lecturer of the Department «Information Security, Information Systems and Physics» Amur Humanitarian Pedagogical State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Klirickv@gmail.com.

Верещагина Александра Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa321@gmail.com.

Ms. Alexandra S. Vereshchagina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa321@gmail.com.

Аннотация. При решении ледотехнических задач используются различные средства и способы. Среди них – резонансный метод разрушения ледяного покрова, реализуемый судами на воздушной подушке (СВП) и заключающийся в возбуждении во льду резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ) [1]. Как показала практика, этот метод в определенных условиях оказывается более эффективным по сравнению с традиционными средствами и технологиями разрушения ледяного покрова. Таким образом, при выполнении ледокольных работ резонансным методом встает задача оценки ледоразрушающей способности возбуждаемых ИГВ. С этой целью разработаны критерии оценки параметров возбуждаемых ИГВ, гарантирующих полное разрушение ледяного покрова. В зависимости от степени изученности процесса разрушения ледяного покрова могут быть использованы такие критерии, как кинематический, силовой, геометрический или энергетический.

Summary. When solving problems heat engineering used various means and ways of solving problems heat engineering using different means and methods. Among them - the resonance method of ice cover destruction implemented by the courts in the stuffy pillow and is to excite resonance in the ice flexural-gravity waves [1]. As shown, this method in certain circumstances, is more effective than traditional means and technologies of destruction of the ice cover. Thus, when the ice-breaking works resonance method stands for cottage-evaluation of ice-breaking ability to excite. To this end, developed criteria for estimating the parameters of excited to ensure complete destruction Ledyaev-turf. Depending on the degree of scrutiny of ice cover destruction process can be used criteria such as: kinematics, power, geometric, or energy.

Ключевые слова: изгибно-гравитационные волны, критерии разрушения, резонансный метод разрушения льда, резонансная скорость.

Key words: gravity waves, failure criteria, the resonance method of ice destruction, the resonance speed.

УДК 629.124.791.2.039

Кинематический критерий

Движущееся по льду СВП должно обеспечивать полное разрушение ледяного покрова. Под полным разрушением или полной потерей ледяным покровом несущей способности принято понимать такую стадию разрушения ледяного покрова, когда его несущая способность не превышает его архимедовы силы поддержания, т.е. отдельные куски льда в составе ледяной пластины не контактируют либо таким образом взаимодействуют друг с другом, что не способны нести нагрузку, превышающую их силу плавучести.

Разрушение ледяного покрова ИГВ представляет собой сложный процесс. По мере развития волн происходит возрастание изгибных напряжений в ледяной пластине. При появлении в ее верхних волокнах напряжений, превышающих предел прочности льда на изгиб, образуются трещины. Ледяная пластина в области возникновения волн наибольшей амплитуды превращается в конструкцию, состоящую из ледяных блоков (см. рис. 1). Несмотря на то, что при этом нарушается ее сплошность, кинематическая и силовая связь области растрескивания с кромками сплошного ледяного поля не позволяет распасться растрескавшемуся льду на отдельные куски. Несущая способность ледяного покрова будет полностью исчерпана только тогда, когда произойдет разрушение образовавшейся блочной конструкции. Она разрушится, если ледяные блоки под действием волны перестанут контактировать друг с другом. Тогда каждый из блоков сможет смещаться и поворачиваться независимо от остальных, а после прохода волны они не смогут вернуться в исходное положение (см. рис. 2).

В области разрушения будут возникать подсоны и наслоения льда, вследствие чего несущая способность ледяного покрова будет полностью утрачена. Это произойдет при некоторой предельной амплитуде $A_{ГП}$, когда нижние волокна блоков на вершине волны не будут испытывать напряжений сжатия.

Значение $A_{ГП}$ зависит от числа обломков n , укладываемых на полудлине волны. Минимальное количество блоков, на которых может формироваться волна, равно четырем. В этом случае, как следует из рис. 3, $A_{ГП} = h$. Верхний предел $A_{ГП}$ можно определить, предположив, что $n = \infty$. Величина n зависит от крутизны волны и при густой сетке трещин, образующейся от нагружения ледяного покрова ИГВ (см. рис. 3), может быть очень большой. Для приближенной оценки верхнего предела $A_{ГП}$ заменим действительную форму деформации ледяного покрова ИГВ дугами окружностей, что дает погрешность в сторону увеличения $A_{ГП}$ при действительной форме изгиба ледяной пластины, т.е. в безопасную сторону. Из рис. 1 видно, что ледяные блоки перестанут контактировать друг с другом, если длина ломаной AKD (при конечном числе обломков) или длина дуги $\cup AKD$ (при бесконечном числе обломков) станут равными расстоянию EF , которое равно полудлине ИГВ. Тогда $A_{ГП}$ будет равна NM . Тогда $A_{ГП}$ будет равна N .

Обозначив $EF = \lambda / 2$, $l' = \cup AKD$ и используя теорему косинусов, находим

$$EF^2 = 2r^2(1 - \cos Y), \quad (1)$$

где r – радиус дуги.

Откуда

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{\lambda^2}{8r^2} \right). \quad (2)$$

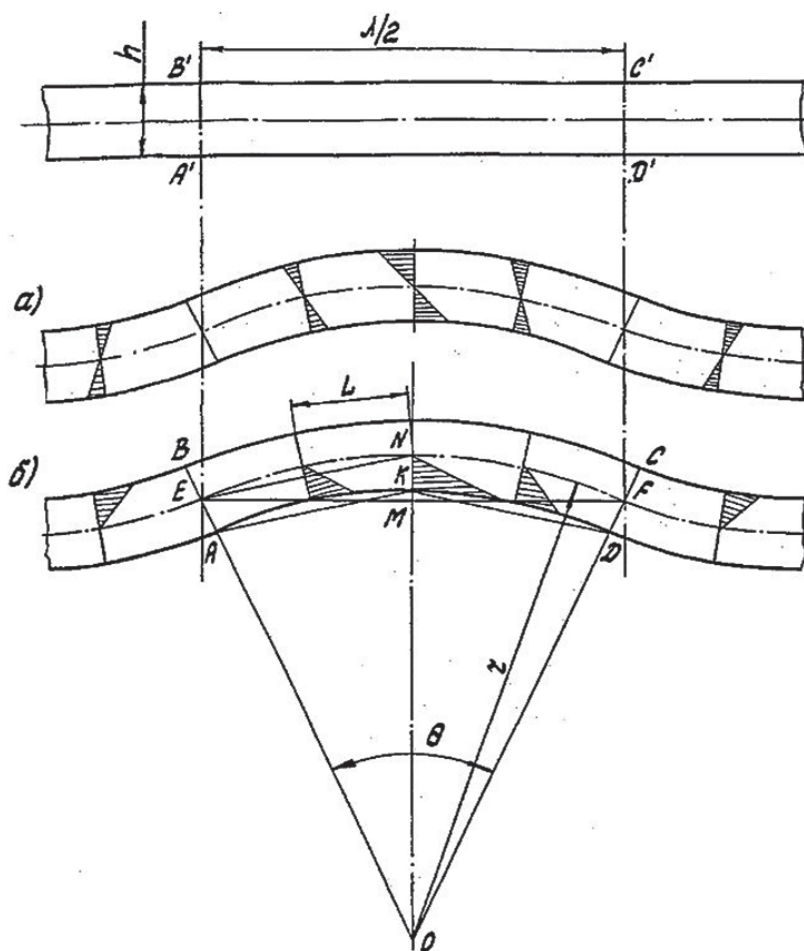


Рис. 1. Схема деформирования ледяного покрова ИГВ и распределение напряжений в пластине: а – до появления трещин; б – после образования трещин



Рис. 2. Характер разрушения ледяного покрова СВП

Величину $A_{ГР}$ определим из условия $l' = \frac{\lambda}{2}$. Воспользовавшись формулой Гюйгенса для длины дуги

$$l = \cup ENF = 2EN + \frac{1}{3}(2EN - EF), \quad (3)$$

получим

$$A_{ГР} = \sqrt{36l^2 + 12l\lambda - 15\lambda^2}, \quad (4)$$

где $l = \frac{\theta \pi r}{180}$.

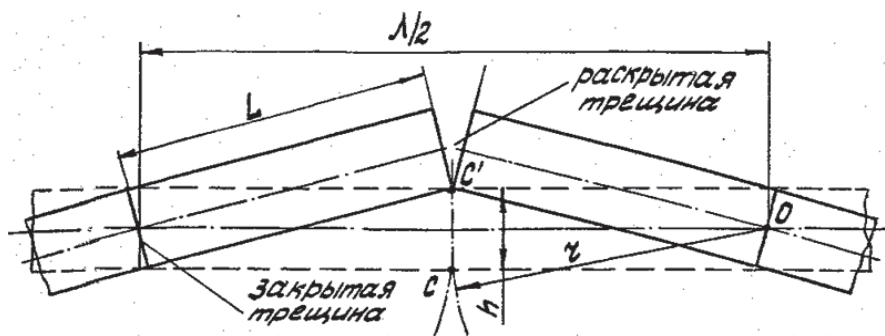


Рис. 3. Схема предельного деформирования ледяного покрова на вершине ИГВ при $n = 4$

Выполненные по формулам (1) – (4) расчеты показали, что как при $n = 2$, так и при $n \rightarrow \infty$ $A_{ГР}$ не зависит от длины ИГВ, и если в первом случае $A_{ГР} = h$, то при бесконечном количестве обломков $A_{ГР} = 1,5h$ [2]. Полученное кинематическое соотношение может служить критерием предельного деформирования ледяного покрова, ослабленного трещинами. Кроме этого, полученное условие позволяет выделить из полной энергии на разрушение ледяного покрова ту часть, которая приходится на его предельное деформирование без учета сопровождающих этот процесс дополнительных разрушений во льду. Однако энергия при разрушении ледяного покрова ИГВ затрачивается еще на образование во льду дополнительных трещин, а также на смятие острых кромок на берегах трещин при предельном деформировании уже растрескавшейся ледяной пластины. Колебания ледяного покрова сопровождаются диссипацией энергии в воде, ледяной пластине и снежном покрове. При распространении во льду ИГВ, вызывающих его разрушение, энергия также рассеивается при частичном отражении и преломлении волн в трещинах, в виде акустической эмиссии и т.д. Теоретическая оценка этих энергетических затрат практически невозможна. Затруднительно определить энергию даже на образование во льду свободных поверхностей, т.е. трещин. Теоретически можно определить лишь условие для их спонтанного роста (критерий Гриффитса).

Силовой критерий

Для определения величины нагрузки, вызывающей при своем движении полное разрушение ледяного покрова, обратимся к экспериментальным данным [2]. Несущая способность ледяного покрова может оцениваться через теоретический уровень напряжений, возникающих в ледяной пластине при ее полном разрушении. Результаты расчетов напряжений в ледяном покрове при изгибно-гравитационном резонансе для экспериментально полученных значений разрушающих нагрузок показали, что во всех десяти рассмотренных случаях (см. табл. 1) теоретические значения максимальных нормальных напряжений σ_x оказались довольно стабильными. Расчеты выполнялись в предположении, что сплошность льда не

Козин В. М., Верещагин В. Ю., Верещагина А. С.
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛЕДОРАЗРУШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

нарушается, исходными данными для расчетов послужили результаты опытов, описанных в [2]. При этом во внимание принимались результаты экспериментов на глубокой воде (влияние мелководья рассматривалось отдельно) с наименьшими (для заданных толщины льда и габаритах модели) нагрузками, вызывающими при своем движении с резонансной скоростью непрерывный процесс полного разрушения ледяного покрова. Средняя величина максимальных относительных напряжений $\bar{\sigma}(\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_u$, где $\sigma_u = 1,2$ МПа – средний предел прочности пресноводного льда на изгиб) составила $\sim 2,08$ (см. табл. 1).

Устойчивые результаты расчётов позволяют в качестве критерия для оценки ледоразрушающих способностей СВП принять теоретическое значение максимальных изгибных напряжений, уровень которых соответствует началу полного разрушения льда за движущимся СВП. То есть если при движении СВП во льду возникают напряжения, максимальные теоретические значения которых оказываются равны или больше найденного $\bar{\sigma}_x^{\max}$, то за судном, возбуждающим такие ИГВ, будет происходить непрерывное полное разрушение ледяного покрова. Найденная экспериментально-теоретическим способом величина $\bar{\sigma}_x^{\max}$ была использована при нормировании значений нагрузок, разрушающих лед резонансным методом, в процессе выполнения исследований по заказу министерства обороны СССР (1984-1988 гг.)

Таблица 1

Результаты расчетов максимальных нормальных напряжений в ледяном покрове [4]

№ п/п	Модели	h , см	Масса, кг	σ_x^{\max} , МПа	$\bar{\sigma}_x^{\max}$
1	Модель I	0,42	2,85	2,75	2,29
2		0,27	1,20	2,24	1,87
3		0,34	2,10	3,06	2,55
3		0,33	1,40	2,18	1,82
4		0,44	2,35	2,21	1,84
5		0,56	4,8	3,16	2,63
6	Модель 3	3,0	71,0	2,37	1,98
7	Модель 4	2,4	250	2,08	1,73
8	Модель 5-II	2,8	450	2,65	2,21
9	Модель 6	6,0	2100	2,68	2,23
10	СВП «Вояжер»	38,0	40800	2,15	1,79

Следует заметить, что толщина разрушаемого льда, рассчитанная с помощью предложенного критерия, не будет предельной. При движении судна над более толстым льдом в последнем могут возникать трещины, ослабляющие его прочность. Последующие проходы будут увеличивать количество трещин, и если толщина льда окажется не очень значительной, то может произойти полное разрушение льда. В таких случаях движение СВП подобно работе ледоколов набегами. Подобное явление наблюдалось при проведении модельных экспериментов. Так, после первого прохода модель разрушала лед толщиной $h = 2,8$ см. После пяти-шести проходов местные разрушения льда возникали и при толщине ледяного покрова $h = 4,4$ см [2].

Геометрический критерий

В работе [3] для оценки ледоразрушающей способности волн разработан геометрический критерий полного разрушения льда, который также можно использовать для прогнозирования ледоразрушающих способностей ИГВ на основании экспериментальных исследований.

В качестве безразмерного параметра, характеризующего полное разрушение сплошного льда, можно принять значение угла наклона касательной к изогнутой поверхности ледяной пластины, соответствующего стадии ее полного разрушения. Поскольку профиль ИГВ в месте приложения нагрузки близок к синусоиде, то его можно представить в виде

$$w = A \sin(kx),$$

где A – амплитуда ИГВ; k – волновое число.

Тогда угол наклона касательной определится производной от уравнения профиля волны:

$$w' = Ak \cos(kx) = \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – угол наклона касательной к профилю плоской ИГВ.

Максимальное значение $\operatorname{tg} \alpha$ найдем из условия экстремума функции, когда производная равна нулю, достигаемое при $kx = 0; \pi; \dots n\pi$, т.е.

$$\operatorname{tg} \alpha^{\max} = Ak = \frac{2\pi A}{\lambda} \approx \alpha, \quad (5)$$

где λ – длина ИГВ.

Полученное выражение для определения α можно использовать в качестве приближенного критерия разрушения сплошного льда изгибом без расчетов его НДС. Для его использования достаточно провести анализ доступной информации по характеристикам ИГВ или иных нагрузок, приводивших к разрушению сплошного льда изгибом, как при моделировании, так и в натурных опытах. При этом различной степени разрушенности льда будет соответствовать свое значение α . Таким образом, число α можно использовать как критерий полного разрушения льда и как условие достижения определенной степени разрушенности ледяного покрова при его нагружении. В этом случае каждому значению α будет соответствовать определенная стадия разрушения льда.

Преимущество разработанного критерия оценки степени разрушенности сплошного льда состоит в его автомодельности, т.е. при анализе модельных данных нет потребности в знании масштаба или условий подобия, необходимых для пересчета на натуру. Полученный критерий оценки степени разрушенности сплошного льда представляет собой геометрический параметр, величина которого не зависит от толщины льда, его механических характеристик, влияния внешних условий. Возможно, это избавит от влияния масштабного эффекта при сравнении модельных и натурных результатов, что в рамках традиционных критериев оценки разрушения достаточно трудно.

Определим значения числа α , используя выражение (5). Для этого будем использовать полученные характеристики резонансных ИГВ (см. табл. 1), приводивших к полному разрушению модельного льда, а также данные натурных наблюдений за разрушением сплошного льда резонансными ИГВ от движения СВП и по статическому пролomu льда сосредоточенной нагрузкой.

Дополнительно выполним расчет изгибных напряжений в сплошном льду и определим удельную энергию U , приходящуюся на единицу длины ИГВ и толщины льда по формуле

$$U = \frac{\rho_2 g A^2 \lambda}{2h},$$

где ρ_2 – плотность воды.

Наклон касательной к изогнутой поверхности льда при статическом нагружении сосредоточенной силой определяется из выражений

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{w_0}{r}, \quad w_0 = 0,43\sqrt{h}, \quad r = 4\sqrt{\frac{D}{\rho_2 g}},$$

Козин В. М., Верещагин В. Ю., Верещагина А. С.
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛЕДОРАЗРУШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

где D – цилиндрическая плотность ледяной пластины.

В процессе модельных исследований по разрушению сплошного льда ИГВ от движения подводного судна было установлено, что при $\alpha > 0,04$ происходит раскрытие магистральных трещин, т.е. достигается полное разрушение ледяного покрова.

При $0,05 > \alpha$ количество ледяных блоков, приходящихся на длину волны, увеличивалось, т.е. размеры блоков уменьшались. Также наблюдалось их наслоение с образованием просветов воды (см. рис. 4) [1].

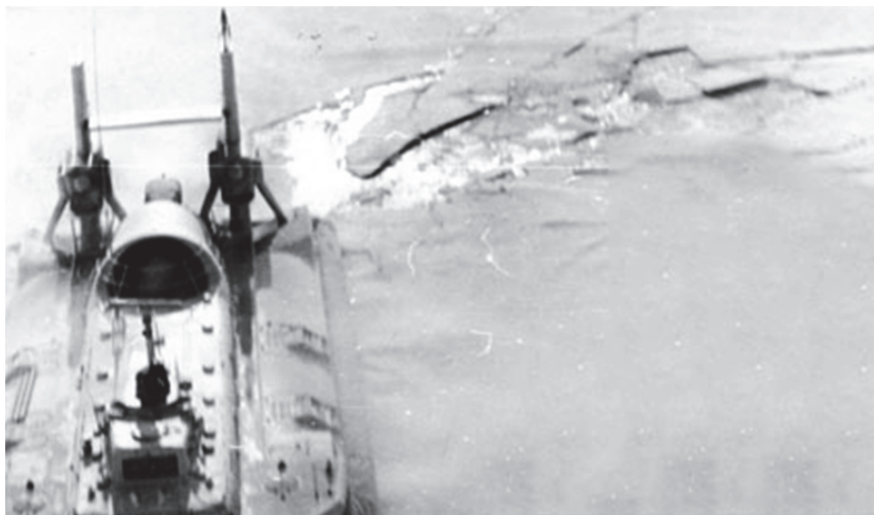


Рис. 4. Разрушение ледяного покрова СВП при его полной потере несущей способности (съемка с вертолета)

Практически все имеющиеся сведения по разрушению льда изгибом соответствуют случаю полного разрушения, во многих из которых энергия ИГВ была избыточной по отношению к достаточной для его разрушения. В этом случае помимо образования сквозных трещин в сплошном льду происходило измельчение обломков льда (см. рис. 5).

По результатам исследований можно сделать вывод о принципиальной возможности использования числа α в качестве критерия полного разрушения сплошного льда при его нагружении изгибом.

Анализ значений α для статического нагружения показал наличие масштабного эффекта, проявляющегося в уменьшении угла наклона касательной с ростом толщины льда. Возможно, это обусловлено размерами испробованных образцов льда и методикой их испытаний. Как оказалось, значения α для ИГВ практически не зависят от толщины сплошного льда.

Физический смысл данного параметра состоит в том, что ледяная пластина деформируется ИГВ до определенной предельной кривизны, при которой ее сплошность нарушается сквозными трещинами, расчленяющими ее на отдельные блоки. Соответственно, предельной кривизне изогнутой поверхности соответствует минимальное значение α , при котором достигается полное разрушение сплошного льда. При буксировках моделей подводного судна (см. рис. 6) получено значение критерия полного разрушения $\alpha = 0,05$. Как видно, это значение хорошо согласуется с данными, полученными в экспериментах с натурными СВП, т.е. его можно будет использовать для прогнозирования ледоразрушающих способностей и подводных судов.

Значение критерия полного разрушения сплошного льда α получено для пресноводного льда, поэтому его использование для морского льда потребует уточнений. Учитывая, что прочность, трещиностойкость и модуль упругости морского льда ниже, чем у пресноводного, то значение α должно быть несколько большим.



Рис. 5. Характер разрушения ледяного покрова при избыточной энергии ИГВ

По имеющимся схемам расположения магистральных трещин в модельном льду, а также по результатам натуральных опытов по разрушению пресноводного льда резонансными ИГВ сопоставим полученные значения критерия полного разрушения с безразмерной шириной ледяных блоков $L/b_{\text{обл}}$, образованных трещинами. Во внимание будем принимать ледяные блоки, образованные магистральными трещинами. Результаты такого сравнения представлены на рис. 7. Используем как результаты модельных испытаний, так и натуральных опытов по резонансному разрушению сплошного льда СВП. Так, при $\alpha = 0,05$ на длину корпуса судна приходится около двух ширин блоков льда. Это необходимо учитывать при определении возможности всплытия подводного судна в разрушенном льду. При найденном значении α , как показали модельные опыты, подводное судно имеет возможность производить всплытие на поверхность без потери его поперечной остойчивости.

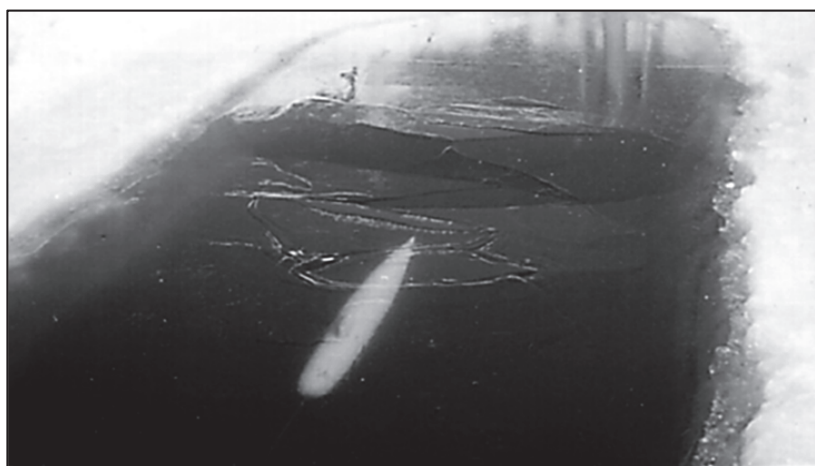


Рис. 6. Буксировка модели подводного судна

Полученный критерий полного разрушения сплошного льда может использоваться в теоретических исследованиях изгибных деформаций льда при нагружении различными нагрузками. Традиционно при решении таких задач выполняется расчет НДС ледяного покрова и по уровню напряжений делают вывод о возможности разрушения льда. Если использовать критерий α для определения момента наступления разрушения ледяной пластины, то достаточно ограничиться нахождением функции прогибов и определить ее первую производную. Тогда по найденному значению производной от функции прогибов ледяной пластины можно будет судить о возможности полного разрушения льда.

Козин В. М., Верещагин В. Ю., Верещагина А. С.
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛЕДОРАЗРУШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

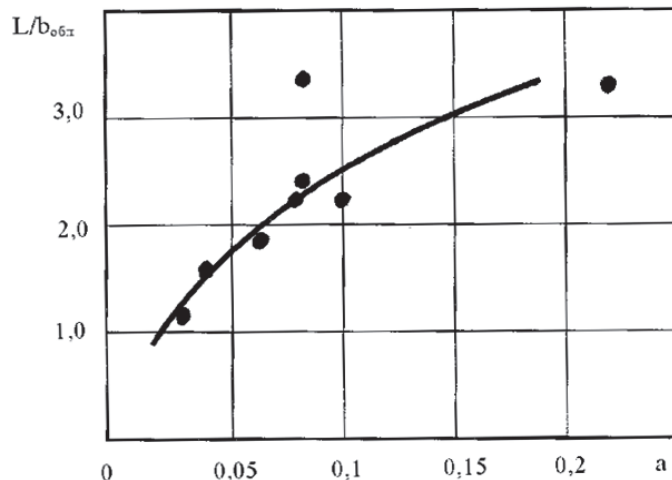


Рис. 7. Изменение относительного размера ледяного блока

Энергетический критерий

Для оценки ледоразрушающей способности ИГВ в работе [4] предложено использовать такую интегральную характеристику, как потенциальную энергию изгиба ледяной пластины U [5], достижение которой приводит к началу полного непрерывного разрушения льда за нагрузкой при ИГВ. Величина U определена по теоретическим полям напряжений, рассчитанных для экспериментально полученных минимальных значений нагрузок, разрушающих ледяной покров при возбуждении в нем резонансных ИГВ.

Для пластины бесконечных размеров потенциальная энергия изгиба определяется выражением

$$U = \frac{1}{4G\lambda_{\sigma}k_m(1+\mu)} \int_0^{\lambda_{\sigma}} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\mu\sigma_x\sigma_y + 2(1+\mu)\tau_{xy}^2) dx, \quad (6)$$

где λ_{σ} – длина волны максимальных напряжений σ_x ; $k_m = \frac{\sigma_h}{\sigma_0}$, здесь σ_h – предел прочности льда на изгиб толщиной h ; σ_0 – предел прочности льда на изгиб толщиной ≥ 80 см (при таких толщинах проявление масштабного эффекта несущественно).

Для уточнения значений предельной плотности потенциальной энергии изгиба ледяной пластины, нормальные σ_x , σ_y и касательные напряжения τ_{xy} были рассчитаны по обобщенной реологической модели [6]. Результаты расчетов U при ИГВ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов плотности потенциальной энергии изгиба [1]

Модели	Толщина, см	Масса, т	U_p , Дж/м ³	U_m , Дж/м ³
СВП «Гепард»	7,5	7,5	582	607
СВП «Скат»	26	20,5	708	694
СВП «Вояжер»	28	38	561	589
ДКВП «Мурена»	60	120	673	651

В табл. 2 значение U_p бралось из работы [1], параметр U_m рассчитывался по формуле (6). Как видно из табл. 3, независимо от принятых в расчетах реологических моделей льда

значения плотностей потенциальной энергии изгиба ледяной пластины U , соответствующей ее полному разрушению, оказались довольно устойчивыми, т.е. данный критерий также может быть использован для оценки ледоразрушающих способностей ИГВ.

Выводы по работе представлены в виде табл. 3.

Таблица 3

Достоинства и недостатки разработанных критериев
и оценки ледоразрушающих способностей СВП

Критерий разрушения	Положительные стороны	Недостатки
Кинематический	Для возможности его использования достаточно измерить амплитуду ИГВ и сравнить ее с толщиной льда h , т.е. применить простой датчик перемещений	Низкая точность измерений. Трудоемкость установки датчиков и возможность их утраты
Силовой	Упрощенная схема расчета НДС ледяной пластины (расчет только нормальных напряжений) при распространении не только плоских, но и трехмерных ИГВ	Не учет касательных напряжений, что при вычислении нагрузок, вызывающих гарантированное разрушение ледяного покрова, будет приводить к их занижению, т.е. к возникновению ошибок в опасную сторону
Геометрический	Позволяет по записи профиля ИГВ довольно просто определить максимальные изгибные напряжения, т.е. прогнозировать ледоразрушающую способность возбуждаемых ИГВ	Необходимость установки оборудования для записи профиля ИГВ с последующей обработкой полученной информации и извлечением самописцев в ледовых условиях
Энергетический	Возможность использования теоретических расчетов НДС ледяного покрова для различных ледовых условий и отсутствие необходимости в проведении экспериментальных исследований	Необходимость привлечения высоко-квалифицированных математиков и программистов

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.04 / Козин Виктор Михайлович. – Владивосток: ИМиМ ДВО РАН, 1993. – 44 с.
2. Козин, В. М. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / В. М. Козин, В. Л. Земляк. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПУ, 2013. – 250 с.
3. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 191 с.
4. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В. М. Козин. – М.: Академия естествознания, 2007. – 355 с.
5. Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с.
6. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия естествознания, 2008. – 329 с.

Дубровский И. Н., Мухорин А. Е., Сотников В. К.
I. N. Dubrovskiy, A. E. Muhorin, V. K. Sotnikov

**ВОЕННЫЙ ИНЖЕНЕР И ПРЕПОДАВАТЕЛЬ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА СОРОКИН ВИКТОР СТЕПАНОВИЧ**

**REGIME DESIGNER AND TEACHER OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR,
THE TECHNICAL UNIVERSITY VIKTOR SOROKIN**

Дубровский Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27; тел. 8 (4217) 53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Mr. Igor N. Dubrovskiy – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Military, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia; tel. 8(4217)53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Мухорин Андрей Евгеньевич – старший преподаватель цикла тактики военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27; тел. 8 (4217) 53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Mr. Andrey E. Muhorin – Senior Lecturer cycle tactics, military department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia; tel. 8(4217)53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Сотников Виктор Константинович – старший преподаватель, начальник цикла тактики военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27; тел. 8 (4217) 53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Mr. Viktor K. Sotnikov – Senior Lecturer, Head of the loop tactics, military department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia; tel. 8(4217)53-00-03. E-mail: vk_nach@knastu.ru.

Аннотация. В данной статье рассматриваются жизненный путь и научная деятельность инженера-ученого, работавшего над переносным зенитным ракетным комплексом (ПЗРК) «Стрела-2», преподавателя кафедры физики Комсомольского-на-Амуре технического университета Сорокина Виктора Степановича.

Summary. This article looks life and scientific figures of the engineer-scientist, developer of portable anti-aircraft missile complex com «Strela-2», as well as lecturer of physics Komsomolsk-on-Amur Technical University Sorokin Viktor Stepanovich.

Ключевые слова: биография, Великая Отечественная война, работа в КнАГТУ.

Key words: biography, The Great Patriotic War, work in KnASTU.

УДК 623.418.22

Мощь советского оборонного комплекса была достигнута при помощи большого количества ученых и конструкторов. Их достижения, как правило, формировались благодаря созданию закрытых конструкторских бюро и научно-исследовательских институтов. С целью поддержания секретности многие из подобных учреждений носили названия «Почтовый ящик» с присвоением специального номера. Деятельность данных организаций была засекречена, имена ученых, в них работавших, не разглашались, а их достижения не публиковались в открытой печати. Только в последнее время появилась возможность назвать имена исследователей, трудившихся в таких НИИ и СКБ. Среди них выделяется имя Сорокина

Виктора Степановича. Информация о его жизни взята из личной автобиографии, написанной при поступлении на работу в Комсомольский политехнический институт, и материалов интервью.



Сорокин Виктор Степанович – родился 25 декабря 1925 г. в деревне Колпино Рославльского района Смоленской области. Его родители – отец Сорокин Степан Гаврилович (1888-1947), мать Сорокина Анна Филипповна (1895-1979) – были служащими. В 1933 г. их сын В.С. Сорокин поступил в первый класс Погарской средней школы Брянской области. В 1941 г. он закончил 8 классов, после чего в связи с началом Великой Отечественной войны прекратил обучение. Став совершеннолетним, в 1943 г. был призван в ряды Советской Армии, где находился до 1950 г. Закончил войну сержантом. Награжден: Орденом Славы 3-й степени и медалями: «За освобождение Варшавы», «За взятие Берлина», «За победу над Германией», а также орденом «Отечественной войны». О войне Виктор Степанович вспоминать не любил. Тем не менее отмечал, что воевать было не страшно.

После демобилизации из рядов Советской Армии в 1950 г. снова поступил в Погарскую среднюю школу, где получил полное среднее образование и закончил её в 1952 г. В том же году поступил в Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Получил диплом спустя шесть лет в 1958 г. по специальности «Физика». Затем работал в достаточно большом количестве учреждений, все из которых так или иначе были связаны с наукой. Так, в октябре 1957 г. стал радиотехником Физического института академии наук (ФИАН) и в этой должности проработал несколько месяцев до декабря 1958 г. В этом же году стал младшим научным сотрудником этого учреждения, а после и старшим инженером. В этой должности работал до сентября 1962 г., пока не устроился на работу инженером в Специальное конструкторское бюро, расположенное в городе Жуковском. Здесь занимался математическими расчетами для зенитного ракетного комплекса «Куб» и ПЗРК «Стрела-2». По словам самого В.С. Сорокина, он написал «всю математику» для функционирования обоих комплексов. Здесь же при войсковой части получил степень кандидата наук. Закончил работу в СКБ-15 в 1969 г.

С марта 1969 и до февраля 1973 гг. являлся начальником сектора, старшим научным сотрудником «Союзморниипроекта» в Москве. После этого с 1973 по 1975 гг. являлся старшим научным сотрудником, а также начальником научного сектора Всесоюзного научно-производственного объединения «Каскад». Параллельно по совместительству работал преподавателем на кафедре физики в Московском институте экономики и математики. Однако после 1975 г. научные интересы Сорокина Виктора Степановича сместились в область исключительно физики. Поэтому с ноября 1975 и до июня 1986 гг. являлся старшим преподавателем и доцентом кафедры физики в институте экономики и математики. После этого в июле 1986 г. уже в пенсионном возрасте устроился на работу в Комсомольский политехнический институт. В силу возраста работа в Комсомольском-на-Амуре техническом университете, по словам Виктора Степановича, уже не была ориентирована на науку. Здесь он занимался в основном составлением образовательных программ и преподаванием, «освободив дорогу молодым». К концу научной карьеры являлся кандидатом технических наук и опубликовал 33 научные работы. Уволился из университета 7 июля 1996 г. С этого времени находился на пенсии, пока не умер в сентябре 2014 г.

Шунейко А. А.

**ВТОРОЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ КОНГРЕСС ИНЖЕНЕРОВ
«НАУКА – ИНЖЕНЕР – ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»**

Шунейко А. А.

A. A. Shuneyko

**ВТОРОЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ КОНГРЕСС ИНЖЕНЕРОВ
«НАУКА – ИНЖЕНЕР – ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»**

**THE SECOND FAR EASTERN ENGINEER CONGRESS
“SCIENCE – AN ENGINEER – INDUSTRY”**

Шунейко Александр Альфредович – доктор филологических наук, профессор кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: shuneyko@ya.ru.

Mr. Alexander A. Shuneyko – D.Sc. in Philology, Professor, Department of Linguistics and Cross-cultural Communication, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: shuneyko@ya.ru.

В Комсомольске-на-Амуре 6-7 октября 2015 г. прошло одно из крупнейших научных событий региона – Второй Дальневосточный конгресс инженеров «Наука – инженер – промышленность». В его работе участвовало более 300 специалистов разного профиля и уровня из различных городов России. Среди них были студенты, инженеры, менеджеры, директора и хозяева предприятий и компаний, ректоры, представители общественных организаций, руководители федеральных и региональных органов власти, кандидаты и доктора наук. Органы власти были представлены губернатором Хабаровского края Вячеславом Шпортом, заместителем председателя комитета по науке, образованию и культуре Совета Федерации ФС РФ Виктором Крессом, мэром Комсомольска Андреем Климовым, заместителем Председателя Правительства – министром инвестиционной и земельно-имущественной политики Хабаровского края Юрием Чайкой, заместителем полномочного представителя Президента РФ в ДФО Владимиром Солодовым, заместителем председателя Координационного совета по делам молодёжи в научной и образовательной сферах при Совете при Президенте РФ по науке, технологиям и образованию Алексеем Андреевым и другими руководителями. Губернатор Хабаровского края, доктор технических наук Вячеслав Шпорт торжественно открыл конгресс, наметил перспективы дальнейшего развития на его закрытии и принимал участие во многих локальных мероприятиях, в частности, в обсуждениях проектов и научных докладов.

Конгресс был организован Правительством Хабаровского края при поддержке Министерства РФ по развитию Дальнего Востока и при партнерстве с ПАО «ОАК», АО «ОСК», группой компаний «Энергия», АНО «ДАСИ». Первый конгресс инженеров проводился в 2013 г. тоже в Комсомольске-на-Амуре и собрал тогда 250 участников. Это позволяет говорить о возникновении позитивной традиции, развивающейся с нарастающими количественными и качественными темпами увеличения эффективности. На пленарном заседании прозвучало предложение узаконить эту традицию: проводить конгресс ежегодно, в рамках празднования Дня рождения Комсомольска-на-Амуре.

Конгресс включал в себя большой и разнообразный комплекс образовательных, научных, маркетинговых и культурных мероприятий: стратегические сессии молодежного форума инженеров, мастер-классы, дискуссии, презентации, открытые лекции, фестиваль уличных культур «Осенний марафон», вывод из дока дизель-электрической подводной лодки Б-187 – «Комсомольск-на-Амуре», научно-практическую конференцию, закладку капсулы в основание будущей Инженерной школы, торжественные заседания. Эти мероприятия, которые в большинстве своём совмещали реализацию сразу нескольких целевых установок, проводились на различных площадках. Ведущее место среди них занимал Комсомольский-на-



Амуре государственный технический университет. Здесь в рамках конгресса прошли: мастер-класс «Опыт разработки и применения композитных материалов», мастер-класс ГК «Делкам-Урал» «Современные технологии проектирования», мастер-класс ОАО НПП «Полигон» «Практический опыт участия высокотехнологичных предприятий в развитии региональной инновационной системы», открытая лекция Фонда «Сколково» «Управление инновационными проектами», III Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие современных социально-экономических систем». Все эти мероприятия характеризовались высоким уровнем совмещения научной и прикладной тематики, вызвавшим заинтересованный отклик у их участников, получивших в результате работы новые исследовательские и производственные ориентиры, пригодные к реальному воплощению.

Студенты и преподаватели КНАГТУ активно участвовали не только в тех мероприятиях, которые проводились на базе их университета. Так, некоторые из них выступили на презентации молодёжных проектов и первом на Дальнем Востоке стендап-шоу Science Slam, формат которого предполагал краткий и доступный рассказ о своих исследованиях. Большую заинтересованность аудитории вызвали проекты магистра Александра Ульянова, который предложил эффективный способ энергосбережения, аспиранток Марии Погарцевой и Екатерины Бурдаковой, которые рассказали об оптимизации производства фюзеляжа самолета и очистке дизельного топлива от вредных примесей серы.

Участники конгресса не ограничивались констатациями научных, организационных и производственных достижений. Их работа, главным образом, была ориентирована на перспективу, устремлена в будущее, направлена на долгосрочное развитие экономического потенциала региона, которое будет осуществляться в различных сферах с использованием комплекса различных механизмов. Был обозначен вектор развития экономики Дальнего Востока, намечены пути создания новых и модернизации действующих производственных мощностей, совершенствования механизмов подготовки квалифицированных инженерных кадров.

В области образования и науки участники конгресса стимулировали разработку Правительством края концепции непрерывного многоуровневого ТИМ-кластера (технологическое, инженерное и математическое образования), а также продолжение и расширение практики популяризации инженерно-технических и рабочих профессий. Будут выработаны эффективные механизмы подготовки и удержания профессиональных технических кадров. Стартовой базой этого является наличие в регионе передового положительного опыта развития дуального образования – практическое обучение, которое проходят студенты вузов на промышленных предприятиях.

Значимость мероприятия выходит за рамки ДФО и затрагивает в равной мере политическую, образовательную, производственную и научную сферы. В итоговой резолюции федеральным органам власти рекомендовано разработать и принять законы «Об инженерной деятельности в Российской Федерации» и «О профессиональных инженерах», в число задач которых входит повышение престижности инженерных специальностей в стране. Правительство Хабаровского края, в соответствии с резолюцией, рассмотрит возможность создания регионального инвестиционного фонда и венчурного фонда для развития инвестиций в малые предприятия научно-технической сферы, разработает и реализует комплекс мероприятий по развитию инновационного территориального кластера авиа- и судостроения. Кроме того, краевые власти обсудят перспективы создания центра инжиниринга и инновационных производств в области специального судостроения и авиации.

ЛИТЕРАТУРА

II Дальневосточный конгресс инженеров // Официальный сайт Правительства Хабаровского края. URL: www.khabkrai.ru (дата обращения: 10.11.2015).

Дзюба В. А., Дорошенко К. М.
V. A. Dzyuba, K. M. Doroshenko

**ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ПРИ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЯХ КОНСТРУКЦИЙ
ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

**CALCULATION OF CURVATURE IN THE INELASTIC DEFORMATION
OF THE STRUCTURE OF NUMERICAL METHODS**

Дзюба Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Victor A. Dzyuba – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Civil and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: fks@knastu.ru.

Дорошенко Ксения Михайловна – магистрант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Ms. Kseniya Doroshenko – graduate student, Department of Civil and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: fks@knastu.ru.

Аннотация. Статья посвящена методу определения кривизны оси железобетонной балки на стадии, близкой к разрушению, путем конечно-разностной аппроксимации. Рассмотрены основные положения данного метода. Приведен анализ надежности предлагаемого метода на основе экспериментальных данных.

Summary. Article is devoted to a method of determination of curvature of an axis of a ferroconcrete beam at the stage close to destruction, by final and differential approximation. Basic provisions of this method are considered. The analysis of reliability of the offered method on the basis of experimental data is provided.

Ключевые слова: кривизна, метод конечно-разностной аппроксимации, напряженно-деформированное состояние, чистый изгиб.

Key words: curvature, a method of final and differential approximation, the stress-strain state, a pure bend.

УДК 69.04

В статически неопределимых системах распределение усилий между отдельными элементами зависит от соотношения жесткостных характеристик конструкций. Например, в ядро-диафрагмовых системах высотных зданий распределение внутренних усилий от горизонтальной ветровой нагрузки между отдельными диафрагмами и ядрами жесткости определяется соотношением их изгибных жесткостей.

Как известно, жесткость железобетонных элементов является переменной величиной, зависящей от действующих в этих элементах усилий. Так, с увеличением изгибающих моментов происходит снижение, в частности, изгибной жесткости конструкций вследствие проявления физической нелинейности материала: образования и раскрытия трещин в растянутой зоне бетона, развития неупругих деформаций в бетоне сжатой зоны, появления пластических деформаций в растянутой арматуре [1; 2]. Нормы проектирования железобетонных конструкций [3] рекомендуют определять жесткость через кривизну оси элемента по известному выражению:

$$B = M / \gamma'' ,$$

где B – изгибная жесткость, M – изгибающий момент, y'' – кривизна оси при изгибе.

При высоких уровнях нагружения после нарушения сплошности материала конструкции и накопления повреждений для оценки жесткости необходимо знание кривизны в функции действующего усилия. Согласно нормам проектирования железобетонных конструкций [3], кривизну рекомендуется определять опытным путем через средние деформации сжатого бетона и растянутой арматуры.

Зависимость изменения кривизны в функции действующих усилий представляет значительный научно-практический интерес применительно к теории нелинейного деформирования железобетона.

В данной работе предлагается новый метод вычисления кривизны на основе конечно-разностной аппроксимации.

Рассмотрим применение этого метода на примере испытания железобетонной балки. Используя метод сеток, можно разбить рассматриваемую балку на бесконечное число элементарных участков с шагом h (Δx) (см. рис. 1).

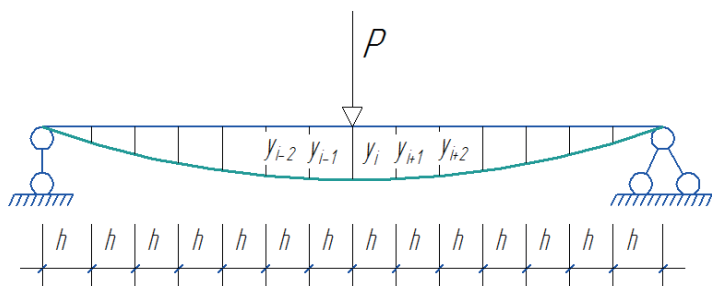


Рис. 1. Разбиение элемента методом сеток

При этом кривизну оси в точке i можно определить методом конечно-разностной аппроксимации по перемещениям смежных точек [4]

$$y''_i = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{(\Delta x)^2}, \quad (1)$$

где y''_i – кривизна балки в i -й точке; y_i – величина вертикального перемещения в i -й точке; y_{i-1} – величина вертикального перемещения на предыдущей точке; y_{i+1} – величина вертикального перемещения на последующей точке; Δx – расстояние между участками.

Для определения кривизны через несмежные участки (y_{i-2} и y_{i+2}) применяется формула [5]

$$y''_i = \frac{y_{i-2} - 2y_i + y_{i+2}}{(2\Delta x)^2}. \quad (2)$$

Таким образом, чтобы определить кривизну с помощью формул (1) и (2), необходимо знать значения функции y (перемещения) в каждой точке элемента, получая их непосредственно при испытании конструкций на поперечный изгиб.

Для исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при изгибе и оценки их жесткости в лаборатории строительных конструкций КнАГТУ были проведены испытания балок по схеме шарнирного опирания с зоной чистого изгиба. Образец представлял собой изгибаемую балку с размерами сечения 120x120 мм и пролетом 1550 мм, изготовленную из высокопрочного бетона класса В90. Для измерения перемещений балки в процессе нагружения вдоль центральной продольной оси верхней грани образца в зоне чистого изгиба были установлены прогибомеры на базе индикаторов часового типа с шагом 130 мм, обеспечивающие точность измерений 0.01 мм. Дополнительно запроектированы и изготовлены мессуры, позволяющие измерять деформации волокон сжатой и

растянутой зон балки в середине пролета по двум граням элемента. Нагружение образца осуществлялось жестким домкратом. За этап испытания выбиралась определенная часть деформации элемента, а именно прогиб в середине пролета.

На рис. 2 представлена схема испытательной установки с прогибомерами и мессурами на опытном образце.

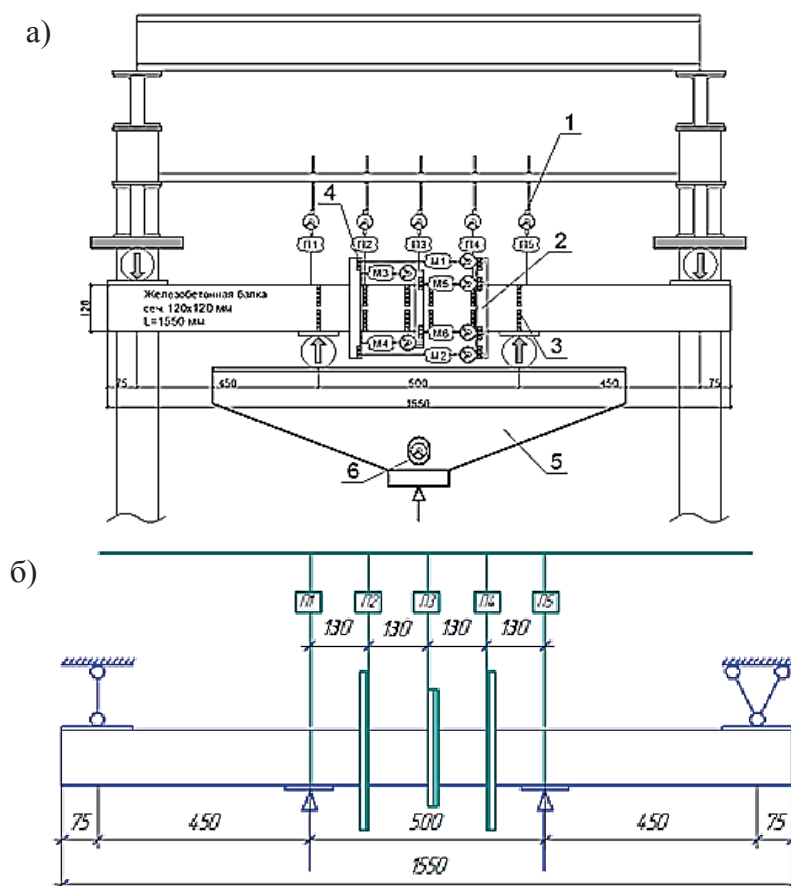


Рис. 2. Схема испытательной установки с прогибомерами и мессурами:
 а – общий вид установки; б – схема расположения приборов: 1 – прогибомеры;
 2 – мессуры; 3 – группы меток для фотоизмерений на балке; 4 – группы меток
 для фотоизмерений на мессурах; 5 – траверса; 6 – индикатор динамометра

При помощи мессур и бесконтактных средств измерения [6] определялись углы поворота сечений, расположенных в местах установки осей прогибомеров (шаг 130 мм).

Через углы поворота (а именно – средние деформации волокон растянутой и сжатой зон) вычислялось значение кривизны оси балки. По полученным результатам был построен соответствующий график «момент-кривизна»:

$$y'' = \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_{tm} + \varepsilon_{cm}}{h_0},$$

где ε_{tm} – средние деформации волокон растянутой зоны; ε_{cm} – средние деформации волокон сжатой зоны; h_0 – рабочая высота сечения; r – радиус кривизны.

Для применения метода конечно-разностной аппроксимации при вычислении кривизны использовались значения вертикальных перемещений точек балки, замеряемых по прогибомерам. Дискретная схема размещения прогибомеров представлена на рис. 3.

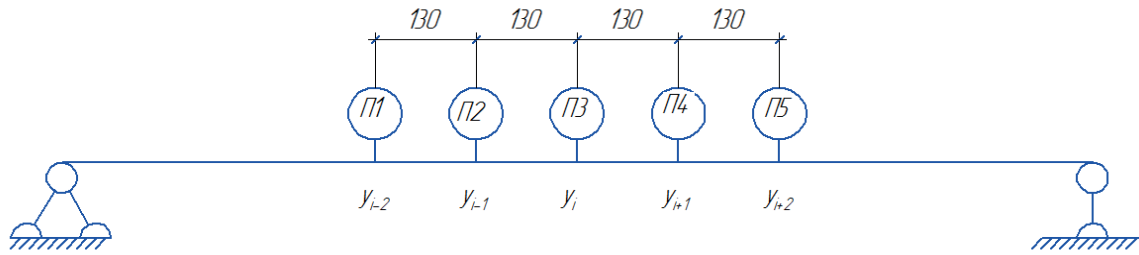


Рис. 3. Схема расположения точек перемещения в зоне чистого изгиба

Значения кривизны вычислялись следующим образом:

1) по данным прогибомеров П1 и П5:

$$y''_{1,5} = \frac{y_1 - 2y_3 + y_5}{(2h)^2},$$

где y_1 – перемещения по прогибомеру П1; y_5 – перемещения по прогибомеру П5; y_3 – перемещения по прогибомеру П3; h – шаг прогибомеров, равный 130 мм [2];

2) по данным прогибомеров П2 и П4:

$$y''_{2,4} = \frac{y_2 - 2y_3 + y_4}{h^2},$$

где y_2 – перемещения по прогибомеру П2; y_4 – перемещения по прогибомеру П4 [3].

Так как использованные в эксперименте прогибомеры часового типа имеют точность 0.01 мм (а не 0.001 мм), то разность изменения перемещений на этапах нагружения между точками $i-1$, $i+1$ и i при такой точности практически не выявлялась. Для измерения кривизны на этапах нагружения следует учитывать показания прогибомеров, измеряющих перемещения точек y_{i-2} и y_{i+2} , так как разность показаний приборов П1, П5 и П3 достаточна для фиксации приращений индикаторами с ценой деления 0.01 мм. В процессе разрушения при снижении отпорности конструкции наилучшее соответствие значениям мессур дают прогибомеры П2 и П4, так как деформации на этой стадии нагружения локализуются в пластическом шарнире центральной части балки.

В табл. 1 представлены результаты расчетов кривизн по трем графикам: вычисленные по средним значениям мессур [6], и новые результаты, полученные по прогибомерам 1, 2, 4 и 5 путем конечно-разностной аппроксимации для центрального сечения (с прогибомером П3). На рис. 4 приведено сопоставление полученных результатов.

Как видно из данного сопоставления, график кривизны, вычисленной по мессурам и данным фотограмметрии, практически совпадает до начала стадии разрушения с графиком кривизны $y''_{1,5}$, составленным по значениям прогибомеров П1 и П5, а значения кривизны, вычисленной по прогибомерам П2 и П4, хорошо согласуются с показаниями мессур при снижении несущей способности (уменьшении изгибающего момента).

Таким образом, предложенный метод вычисления кривизны путем конечно-разностной аппроксимации является надежным математическим аппаратом, существенно улучшающим оценку кривизны и упрощающим процедуру испытаний, так как при этом отпадает необходимость в использовании средств фотограмметрии, мессур, расположенных непосредственно на образцах. Это позволяет вести расчет статически неопределимых систем с переменной жесткостью элементов и получать действительную картину напряженно-деформированного состояния здания в целом.

Дзюба В. А., Дорошенко К. М.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ПРИ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЯХ КОНСТРУКЦИЙ
ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Таблица 1

Результаты расчетов

№ п/п	М (без учета выдержки), кН·м	Среднее по мессурам	$y''_{2,4}$	$y''_{1,5}$
1	0	0	0	0
2	1.60803	0.003866	0.011538462	0.004763314
3	2.7078975	0.008438	0.018994083	0.009289941
4	3.75327	0.012936	0.023609467	0.013579882
5	4.75173	0.017418	0.02964497	0.018136095
6	5.73903	0.021899	0.032781065	0.022189349
7	6.625305	0.025988	0.047159763	0.02658284
8	7.400655	0.030463	0.052248521	0.030857988
9	7.901955	0.036848	0.059230769	0.036804734
10	7.930305	0.041014	0.067218935	0.040798817
11	7.958655	0.045592	0.074260355	0.045236686
12	8.07183	0.049982	0.08	0.049186391
13	8.10018	0.053194	0.083195266	0.052573964
14	8.1566775	0.0575	0.087455621	0.056627219
15	8.10018	0.061219	0.095029586	0.061508876
16	8.128305	0.064714	0.103431953	0.067721893
17	8.21313	0.070867	0.109171598	0.074497041
18	8.29818	0.078625	0.118698225	0.081952663
19	8.354655	0.086233	0.132248521	0.089511834
20	8.46783	0.102494	0.148224852	0.105606509
21	8.835705	0.130428	0.183846154	0.136139053
22	9.458505	0.172086	0.239940828	0.182559172
23	9.82638	0.211474	0.278579882	0.211346154
24	9.911205	0.231564	0.278579882	0.233920118
25	10.052955	0.245232	0.274733728	0.266952663
26	10.096155	0.268204	0.283846154	0.289467456
27	9.9112275	0.286424	0.291242604	0.311952663
28	8.1566775	0.310248	0.309822485	0.332248521
29	7.649955	0.373996	0.363372781	0.386952663
30	5.711355	0.474855	0.471183432	0.473550296

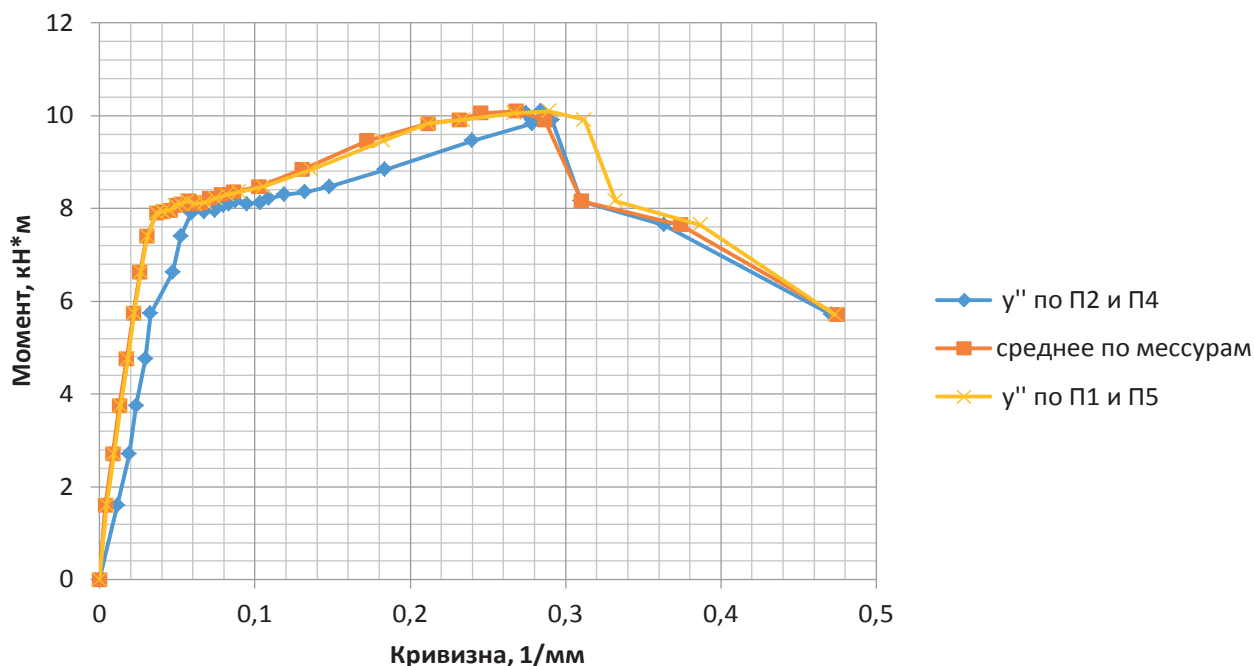


Рис. 5. Сопоставление расчетных и опытных (по мессурам) значений кривизны на диаграмме «момент-кривизна»

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюба, В. А. Применение составной функции диаграммы сжатого бетона для деформационной оценки конструкций / В. А. Дзюба, Ю. С. Глушакова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1(18). – С. 109-114.
2. Дзюба, В. А. Применение испытательного оборудования MTS для определения параметров деформирования железобетонных балок различного армирования / В. А. Дзюба, Сюй Яфенг, А. Л. Ковалев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 108-111.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Министерство регионального развития РФ. – М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2012. – 156 с.
4. Дзюба, В. А. Определение кривизны при изгибе методом конечно-разностной аппроксимации / В. А. Дзюба, К. М. Дорошенко // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: Междунар. науч.-практ. конф. (Комсомольск-на-Амуре, 28-29 ноября 2014 г.): материалы и доклады. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – С. 262-267.
5. Численное дифференцирование // www.toehelp.ru. URL: <http://www.toehelp.ru/theory/informat/lecture10.html> (дата обращения: 25.05.2015).
6. Дзюба, В. А. Деформации бетона при высоких уровнях нагружения конструкций / В. А. Дзюба, А. Ю. Добрышкин // Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке: Междунар. науч.-практ. конф. (Комсомольск-на-Амуре, 23-25 апреля 2014 г.): материалы и доклады. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – С. 64-69.
7. Численные методы анализа / под ред. Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
8. Дарков, А. В. Сопrotивление материалов: учеб. для техн. вузов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 624 с.