



The calculation of deflected mode and temperature fields with the help of the method of finite elements for zones of wire deformation in dies for current and new technology of drawing of wire with diameter 0,41 mm is carried out.

М. Н. ВЕРЕЩАГИН, Ю. Л. БОБАРИКИН, ГГТУ им. П.О.Сухого,
А. Н. САВЕНКО, А. В. ВЕДЕНЕЕВ, РУН «БМЗ», М. Ю. ЦЕЛУЕВ, ГГТУ им. П.О.Сухого,
О. И. ИГНАТЕНКО, РУП «БМЗ»

УДК 669.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПРОВОЛОКЕ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Одним из самых перспективных направлений развития металлокордного производства в странах СНГ и дальнего зарубежья является разработка и использование мероприятий, повышающих прочность металлокорда путем увеличения временного сопротивления разрыву проволоки, используемой в его конструкции. Использование металлокорда повышенной прочности способствует снижению массы шины за счет снижения доли массы металлокорда, улучшает эксплуатационные свойства шин, что повышает их потребительские свойства. В связи с этим уже начато производство сверхвысокопрочной проволоки (предел прочности 3500–3800 МПа), ведутся активные разработки в области получения ультравысокопрочной проволоки (предел прочности 3800–4200 МПа) и разрабатываются принципиальные основы получения мегавысокопрочной проволоки.

Увеличение прочности проволоки достигается увеличением суммарной деформации сечения стальной проволоки на последнем переделе волочения или увеличением содержания углерода в стали проволоки. Возможности пути наращивания суммарного обжатия ограничены в связи с ограниченной пластичностью обрабатываемого металла. По этой причине прочность проволоки увеличивают повышением содержания в ней углерода, используя стали 90, 100 и 110.

Современные условия требуют наращивания объемов производства сверхвысокопрочного металлокорда. Это в свою очередь требует повышения производительности волочения сверхвысокопрочной проволоки. Наиболее эффективно повышать производительность волочения увеличением скорости волочения, что и практикуется в металлокордном производстве. Но высокоскоростное волочение сверхвысокопрочной проволоки приводит к росту обрывности при свивке металлокорда.

Рост обрывности проволоки связан с процессом деформационного старения при деформации проволоки в волоках, а также с неравномерностью деформаций и напряжений по сечению проволоки. С увеличением скорости волочения процесс деформационного старения интенсифицируется и совместно с неравномерностью распределения напряжений и деформаций в объеме проволоки вызывает недопустимую потерю пластичности стали проволоки, приводящую к потере ее качества и росту обрывности. Это в целом снижает эффективность производства сверхвысокопрочного металлокорда. Для снижения обрывности и повышения качества сверхвысокопрочного металлокорда необходимо определить новые режимы высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной проволоки, обеспечивающие допустимую степень деформационного старения.

На РУП «БМЗ» в СТПЦ-2 существующий уровень скорости волочения стальной латунированной проволоки из стали 90 диаметром 0,41 мм ограничен 5 м/с, так как при более высоких скоростях повышается обрывность проволоки при свивке.

Известные исследования в области изучения деформационного старения при холодной пластической деформации сталей [1] определяют диапазон температур от деформационного тепловыделения 300–400 °С, выше которого деформационное старение снижает пластичность деформируемой стали в недопустимой степени. Одним из критериев оценки режимов волочения является допустимая температура в проволоке. В соответствии с ним при волочении проволоки температура в любом ее сечении или микрообъеме не должна превышать 300 °С, что является практической гарантией отсутствия отрицательных температурных последствий в проволоке.

Для разработки новых режимов высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной проволоки необходимо исследовать изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) и распределение температурных полей (ТП) в объеме проволоки, в том числе и на контакте, при увеличении скорости ее волочения. При этом оценка режимов высокоскоростного волочения выполнена по критерию допустимой температуры в проволоке.

Оценку влияния скорости волочения на ТП очага деформации и его НДС производили с использованием метода конечных элементов (МКЭ) на основе математического аппарата механики деформируемого твердого тела и теории пластичности.

На рис. 1 показана схема процесса волочения проволоки через осесимметричную волоку. Для упрощения задачи были приняты следующие допущения: НДС и ТП являются осесимметричными, что исключает действие внешних массовых сил; материал волоки абсолютно жесткий, а материал проволоки – несжимаем и пластичный; в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90% работы пластического деформирования.

С учетом принятых допущений установившееся напряженно-деформированное и температурное состояние всех точек M сплошной среды, принадлежащих области V , ограниченной поверхностью S , будет описываться следующей системой уравнений [2–5]:

1) уравнения движения:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = \rho a_r, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} = \rho a_z;$$

2) уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

3) уравнения связи деформаций и перемещений:

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r},$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r},$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$\epsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right); \quad (3)$$

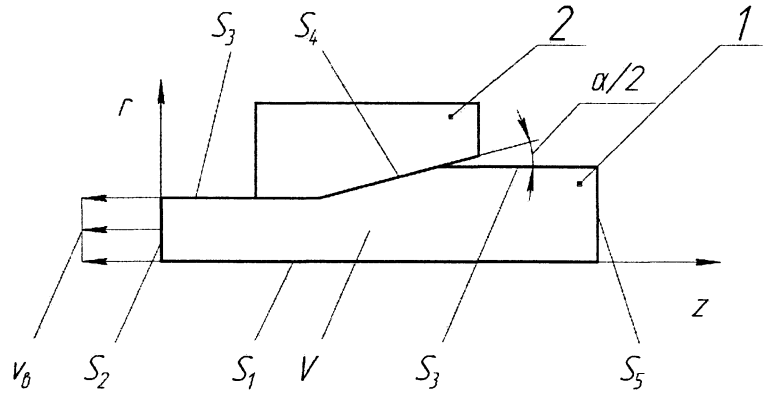


Рис. 1. Схема процесса волочения проволоки: 1 – проволока; 2 – волока; V – область деформации; α – угол деформирующей зоны волоки; S_i – граничные поверхности, $i = 1-5$; V – область очага деформации; r, z – координатные оси

4) уравнения связи скоростей деформаций и скоростей перемещений:

$$\xi_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r},$$

$$\xi_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r},$$

$$\xi_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z},$$

$$\xi_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \quad (4)$$

5) уравнения связи ускорений и скоростей:

$$a_r = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z},$$

$$a_z = v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad (5)$$

6) уравнение теплопроводности:

$$c\rho \left(v_r \frac{\partial t}{\partial r} + v_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + 0,9TH; \quad (6)$$

7) уравнение теории пластичности Мизеса:

$$(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 6\sigma_{zr}^2 = 2\sigma_s^2, \quad (7)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; a_i – компоненты вектора ускорения; ρ – плотность; v_i – компоненты вектора скорости; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; ϵ_{ij} – компоненты тензора деформаций; u_i – компоненты вектора перемещений; t – температура; c – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_s – сопротивление пластическому деформированию.

Данная система уравнений решается при следующих граничных условиях:

а) на поверхности S_1 , совпадающей с осью z , выполняется условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial \bar{v}}{\partial n} \right|_{S_1} = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_1} = 0;$$

б) на поверхности S_2 задана скорость волочения проволоки:

$$v \bar{n} \Big|_{S_2} = v_b, \quad (9)$$

в) на свободной поверхности проволоки S_3 отсутствуют внешнее давление и теплообмен с окружающей средой:

$$\sigma \bar{n} \Big|_{S_3} = 0, \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_3} = 0;$$

г) на поверхности контакта проволоки и волокна S_4 выполняется условие обтекания волокна материалом проволоки, действуют силы трения Амонтона–Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50% работы сил трения:

$$v \bar{n} \Big|_{S_4} = 0,$$

$$\bar{\tau} \Big|_{S_4} = f \left| \sigma \bar{n} \Big|_{S_4} \right| \frac{|\bar{v}|_{S_4}}{|\bar{v}|_{S_4}}, \quad (11)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_4} = 0,5 \left| \bar{\tau} \Big|_{S_4} \right| |\bar{v}|_{S_4};$$

д) на поверхности S_5 задано распределение температуры:

$$t \Big|_{S_5} = t_0,$$

где \bar{v} – вектор скорости; \bar{n} – направление нормали; f – коэффициент трения; $\bar{\tau}$ – касательное напряжение, t_0 – температура окружающей проволоку среды; v_b – скорость волочения проволоки.

Зависимость сопротивления деформированию (рис. 2) от деформации материала проволоки получили аппроксимацией методом наименьших квадратов экспериментальных данных, полученных при стандартных испытаниях проволоки из стали 90 на растяжение, с последующей корректировкой по скорости деформации на основе литературных данных [6]:

$$\sigma_s = (1,374 + 0,114 \lg(\xi_i)) \times (999 + 544,31 \ln(\epsilon_i)), \text{ МПа}, \quad (12)$$

где ξ_i – интенсивность скоростей деформаций; ϵ_i – интенсивность деформаций.

Физико-механические и теплофизические свойства стали проволоки были приняты по данным работы [7]. Скорость волочения изменялась в пределах 5–8 м/с при коэффициенте трения $f=0,02-0,05$. Угол конуса волокна составлял $\alpha=6^\circ$ при длине калибрующей зоны волокна $l=(0,4-0,5)d$ (d – диаметр калибрующей зоны волокна). Волочение производится с диаметра 2,23 мм на диаметр 0,412 мм.

Логарифмическую (истинную) степень деформации определяли по зависимости

$$e_i = \ln \left(\frac{d_{i-1}^2}{d_i^2} \right), \quad (13)$$

где i – номер перехода волочения.

Суммарная логарифмическая (истинная) степень деформации, накопленная к i -му переходу волочения, находилась как сумма логарифмических степеней деформаций в предыдущих волокнах по ходу волочения

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n e_i.$$

Динамическое деформационное старение высокоуглеродистых сталей – физико-химический процесс, степень протекания которого зависит от времени деформирования. При этом смена температурного режима волочения по переходам является эффективным способом варьирования вклада деформационного старения в формирование свойств холоднодеформированной проволоки. Отличающийся при волочении разогрев поверхностных и центральных слоев проволоки

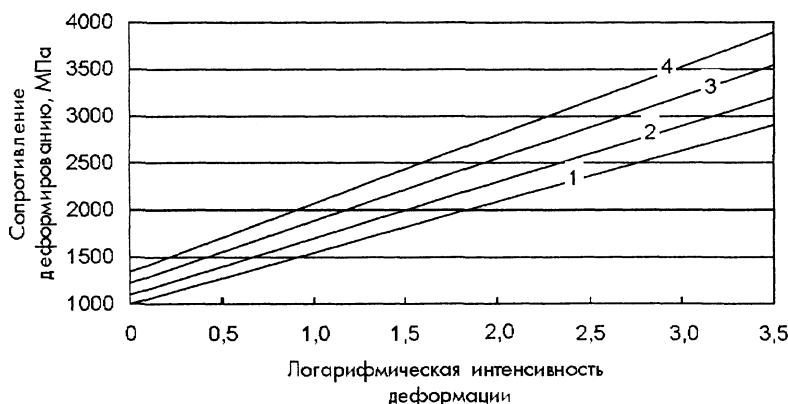


Рис. 2. Зависимость сопротивления деформированию σ_s от логарифмической интенсивности деформаций $\ln(\epsilon_i)$ для различных интенсивностей скоростей деформаций ξ_i ; 1 – $\xi_i=0,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 2 – $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; 3 – $0,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; 4 – $0,8 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$

является причиной различной степени старения по сечению металла, что влияет на уровень напряженно-деформированного состояния проволоки и, как следствие, на качество готовой продукции. Для разработки новых режимов высокоскоростного волочения сверхвысокопрочной проволоки необходим анализ НДС прово-

локи и ТП очага деформации при увеличении скорости ее волочения.

Анализ расчетных деформационно-кинематических и энергосиловых параметров процесса волочения проволоки диаметром 2,45 мм с конечной скоростью волочения 5–8 м/с при коэффициенте трения 0,02–0,05 показал, что наиболее тяжелым с точки зрения тепловыделения зоне деформации является 23-й переход действующего маршрута волочения со скоростью 5 м/с, где максимальная температура достигает 335,4 °С. При конечной скорости 8 м/с данная температура увеличивается до 393,7 °С для того же коэффициента трения 0,05, что значительно превосходит температуру максимального развития деформационного динамического старения для патентованной стали 90.

На рис. 3 приведены результаты численного расчета ТП при волочении проволоки диаметром 0,467 мм (23-й переход) для конечной скорости волочения 5 м/с (рис. 3, а) и 8 м/с (рис. 3, б) при коэффициенте трения $f=0,05$, что соответствует граничному условию трения. Рост скорости волочения ведет к значительному повышению температуры до 396,4 °С на контакте проволока–волокна и, как следствие, к интенсивному развитию процесса деформационного динамического старения (ДДС).

По данным работы [7], минимум температурной зависимости числа скручиваний для сталей 50, 60 и 70 приходится на температуры волочения 300–400 °С.

Очевидно, что переход на скорость волочения 8 м/с для стали 90 приведет к еще меньшему числу скручиваний, а это вызовет резкое понижение качества готовой продукции и металлокорда в частности.

Анализ рис. 3 показывает, что распределение температуры в оча-

ге деформации для скорости волочения 8 м/с по сравнению со скоростью волочения 5 м/с отличается большей неравномерностью, хотя на выходе из калибрующей зоны эта неравномерность несколько выравнивается.

Таким образом, из сказанного выше можно сделать вывод, что одним из путей снижения температуры в очаге деформации является уменьшение коэффициента трения на контакте проволока–волокна. На рис. 4 представлен численный расчет поля температур при волочении проволоки диаметром 0,467 мм (23-й переход) при коэффициенте трения $f=0,02$. Отличительной особенностью результата расчета является резкое снижение температуры в очаге деформации до 241,4 °С, что на 155 °С меньше, чем при коэффициенте трения $f=0,05$ и той же скорости волочения 8 м/с. Кроме того, распределение температуры проволоки по сечению после выхода из очага деформации от-

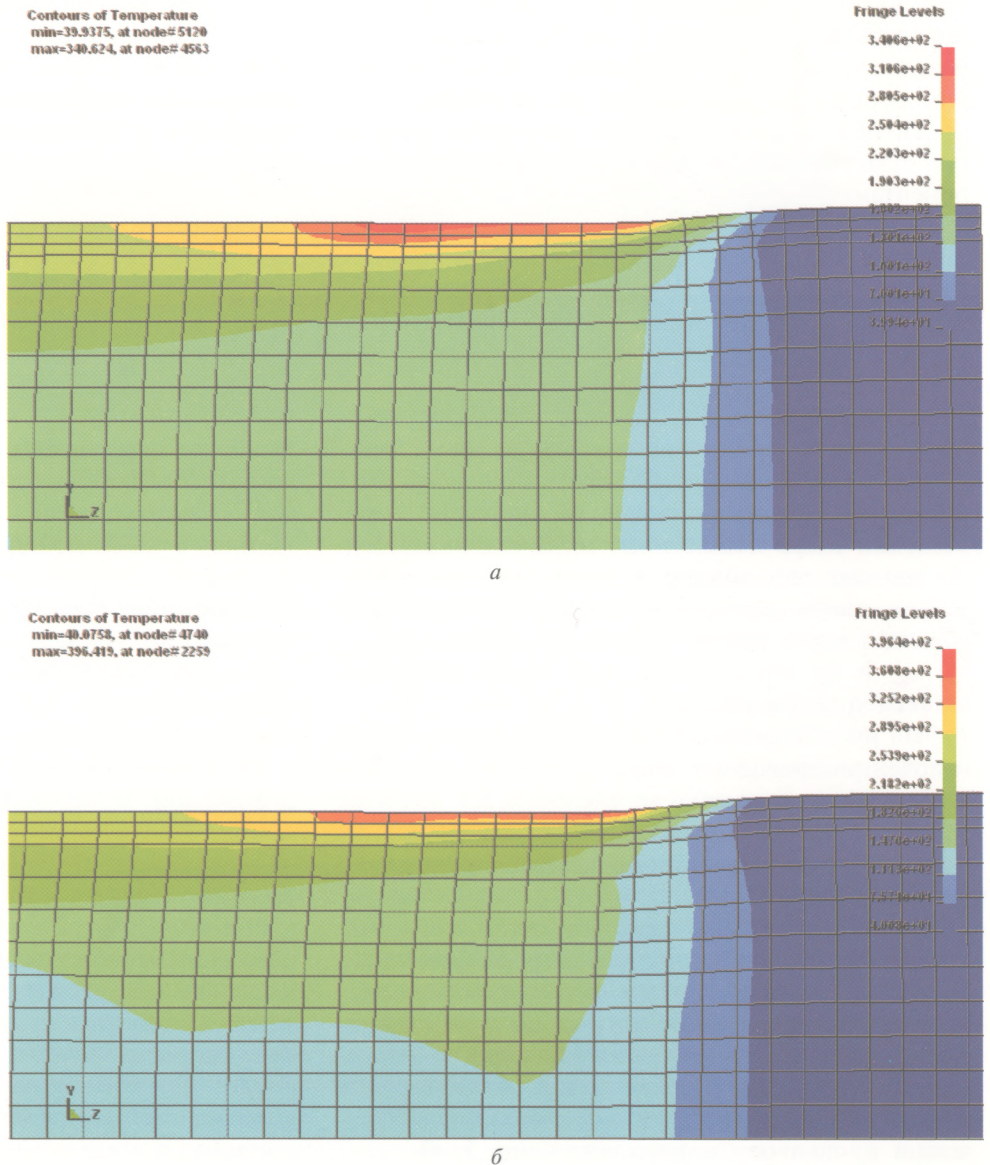


Рис. 3. Поле температур T , °С, при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 (а) и 6,227 м/с (б) при коэффициенте трения 0,05

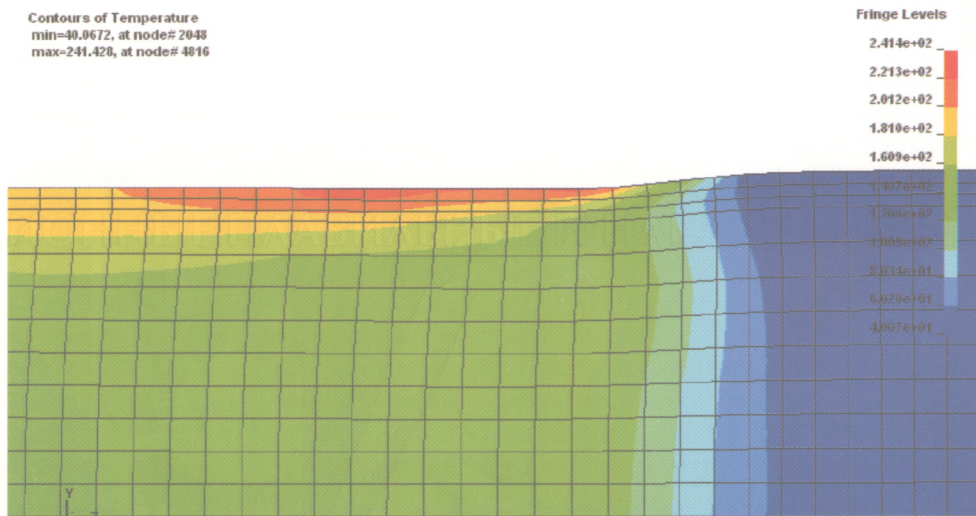


Рис. 4. Поле температур T , °C, при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,02

личается большей равномерностью, что является результатом уменьшения сил трения в очаге деформации и изменения напряженно-деформированного состояния проволоки в сторону снижения остаточных напряжений по сечению.

Полное деформированное состояние металла при пластической деформации описывается компонентами тензоров деформации и их скоростей, а также инвариантными характеристиками: интенсивностью скоростей деформаций сдвига H и интенсивностью деформаций сдвига G , которая характеризует нарастающую, накопленную деформацию. По распределению H можно точнее указать зоны затрудненной и повышенной интенсивности деформирования, оценить неравномерность проработки металла пластической деформацией.

Компоненты скоростей деформации могут быть получены дифференцированием скоростей перемещений вдоль линии тока, тогда как компоненты тензора деформации и интенсивность деформации сдвига получены интегрированием их приращений вдоль линий тока. При определении ϵ_{zz} , ϵ_{rr} , $\epsilon_{\theta\theta}$ и $\epsilon_{r\theta}$ учитывается знак соответствующих скоростей деформации.

На рис. 5 приведены поля деформаций ϵ_{zz} при волочении проволоки диаметром 0,467 мм (23-й переход) со скоростью волочения 6,227 м/с, что соответствует скорости волочения на последнем переходе 8 м/с при коэффициенте трения 0,05 (рис. 5, а) и 0,02 (рис. 5, б).

Анализ расчетных данных показывает, что распределение компонентов деформированного состояния в начале очага при установившемся течении металла свидетельствует об интенсивном течении периферийных слоев заготовки и затрудненной деформации. Уменьшение коэффициента трения до $f=0,02$ ведет к выравниванию деформаций ϵ_{zz} по очагу деформации (рис. 5, б).

Характер изменения компонентов деформированного состояния в остальной части пластичес-

кой зоны аналогичен известному при волочении через конический канал волокна с калибрующей частью. Однако следует заметить, что размеры этих зон по абсолютной величине компонентов деформации неодинаковы, причем рост скорости волочения и уменьшение трения ведут к выравниванию этих величин и большей проработке металла пластической деформацией. Равномерность распределения по сечению компонентов деформации наряду со сказанным может быть увеличена за счет уменьшения угла волокна, исходного диаметра заготовки (дробление маршрута волочения) и увеличением степени деформации.

На протяжении пластической зоны компоненты деформации ϵ_{zz} не меняют знак (рис. 5). Наиболее чувствительная к условиям на контакте величина деформации сдвига $\epsilon_{r\theta}$ отражает изменение характера трения. Снижение коэффициента трения с 0,05 до 0,02 при той же скорости уменьшает абсолютную величину деформации $\epsilon_{r\theta}$. Варьирование параметрами процесса — степенью деформации, углом волокна, масштабным фактором (диаметром проволоки) влияет лишь на величину неравномерности деформации, но не изменяет общей картины течения.

Численный расчет поля компонентов тензора деформаций ϵ_{rr} , $\epsilon_{\theta\theta}$ и $\epsilon_{r\theta}$ выявил зоны знакопеременных деформаций.

Распределение компонентов деформаций по сечению отражает общую закономерность картины течения внутри очага деформации. Центральные слои остаются наиболее вытянутыми, поверхностные получают меньшую деформацию удлинения. Особенно неравномерно это происходит для скорости 5 м/с и коэффициента трения $f=0,05$. Рост скорости волочения до 8 м/с и уменьшение коэффициента трения до $f=0,02$ приводят к тому, что проволока из очага деформации выходит практически с одним уровнем деформации ϵ_{zz} по сечению.

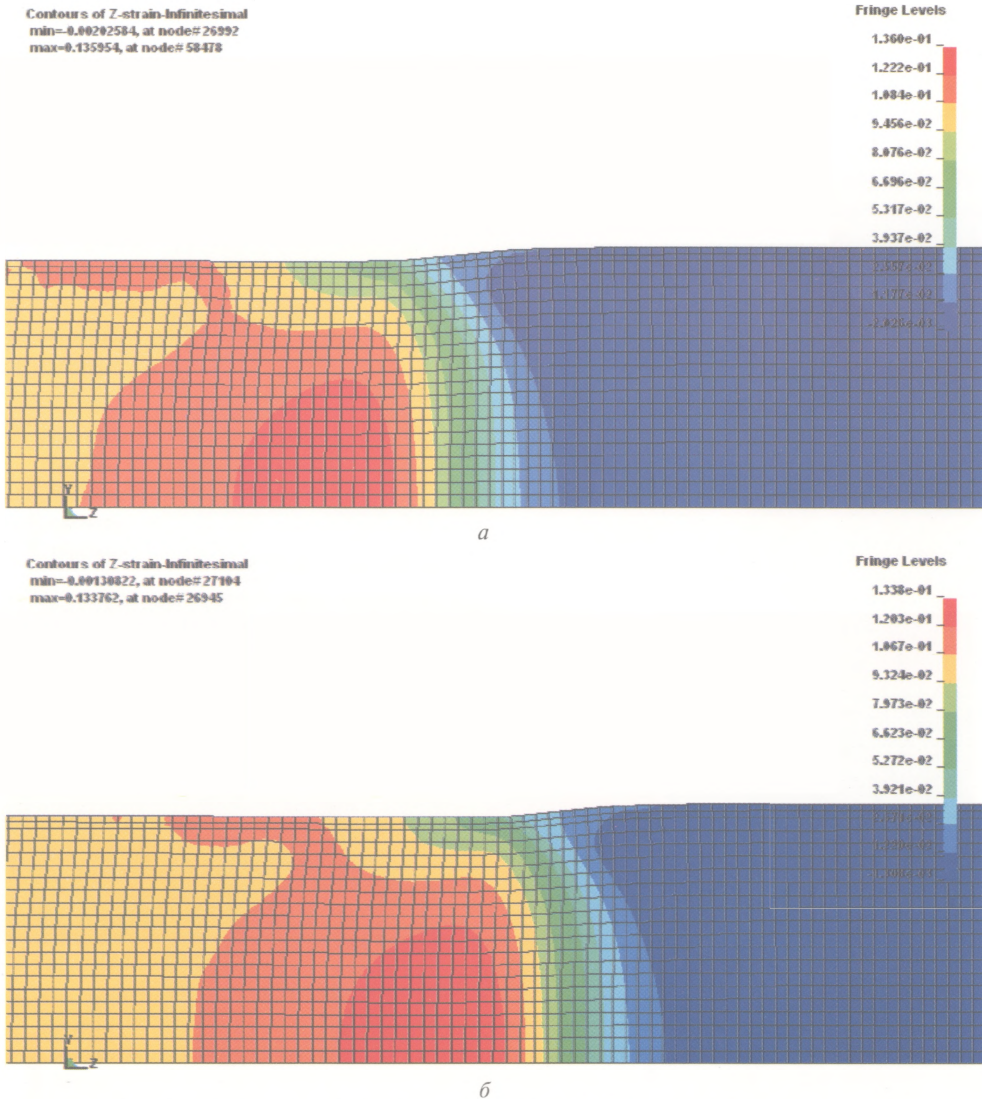


Рис. 5. Поле деформаций ϵ_{zz} при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,05 (а) и 0,02 (б)

Различия в распределении радиальных (ϵ_r) и тангенциальных ($\epsilon_{\theta\theta}$) компонентах тензора деформации независимо от технологических параметров настолько незначительны, что позволяют считать $\epsilon_r = \epsilon_{\theta\theta}$.

В процессе течения металла через волоку величина интенсивности пластической деформации ϵ_{pl} возрастает. Однако это увеличение неравномерно для различных слоев заготовки. В пластической зоне имеет место перераспределение деформаций между слоями. В начале пластической зоны деформация поверхностных слоев несколько больше, чем нижележащих. Затем имеются сечения с равной степенью деформации, после которых внутренние слои деформируются в значительно большей степени, чем поверхностные. На выходе из волоки величина деформации центральных слоев вновь остается минимальной. Положение первой зоны деформации отражает изменение силовых условий на контактной поверхности и зависит от параметров процесса. Дальнейшее перераспределение деформаций и увеличение степе-

ни деформации поверхностных слоев связано с влиянием деформации сдвига ϵ_{rz} , так как все нормальные компоненты тензора деформаций ϵ_r , $\epsilon_{\theta\theta}$, ϵ_{zz} имеют наибольшее значение в центре очага деформации.

Неравномерность деформации определяется главным образом величиной сдвиговых деформаций ϵ_{rz} . Очевидно, что те параметры, которые влияют на величину деформаций сдвига, будут определять и степень неравномерности деформаций. Действительно, уменьшение угла волоки и увеличение степени деформации значительно снижают неравномерность формоизменения по сечению. Неравномерность деформации в непосредственной близости от оси невелика. По мере удаления от оси неравномерность увеличивается, достигая максимума на поверхности проволоки.

Напряженное состояние металла в процессе истечения его через коническую волоку зависит от многих факторов: геометрии и формы волоки, условий трения на контакте металла и инструмен-

та, свойств обрабатываемого металла, скорости деформирования.

В данном случае численный расчет компонентов напряженного состояния, как и деформированного, выполнен для стационарной стадии процесса с использованием метода конечного элемента. В расчетах учитывали упрочнение металла при деформировании и влияние скорости деформации на величину сопротивления деформированию.

В результате численных расчетов определяли поля значений напряжений σ_{zz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{rz} в пластической области. Напряженное состояние определяется главным образом кинематикой про-

цесса истечения и силовыми граничными условиями. Поэтому очевидно, что от изменения параметров процесса (скорости волочения, коэффициента трения) будет непосредственно зависеть характер распределения напряжений в металле.

На рис. 6 приведены результаты численного расчета полей напряжений σ_{zz} при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 м/с и коэффициенте трения 0,05. Данные режимы соответствуют 23-му переходу маршрута волочения с диаметра 2,23 мм на диаметр 0,412 мм при скорости волочения 5 и 8 м/с соответственно.

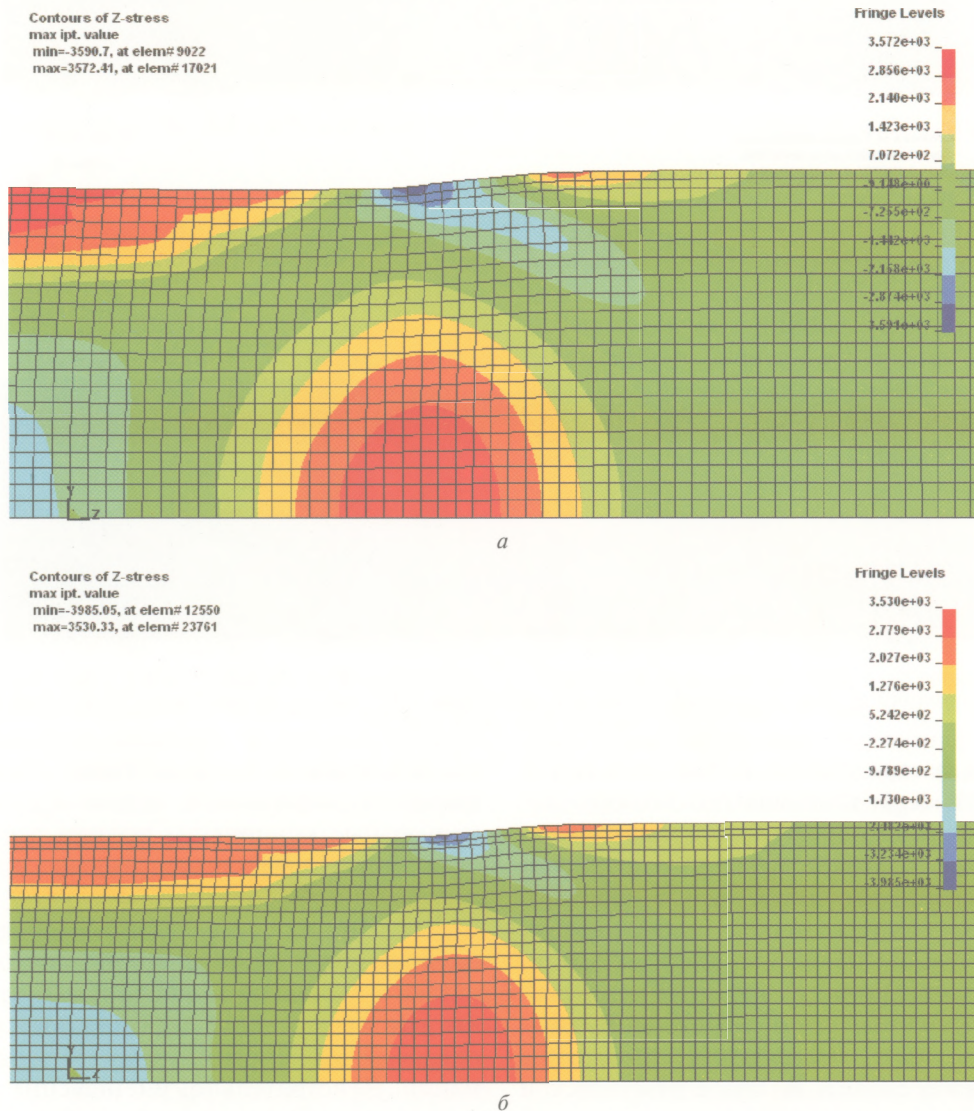


Рис. 6. Поле напряжений σ_{zz} , МПа, при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 м/с при коэффициенте трения 0,05 (а); со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,02 (б)

Из рисунка видно, что продольные напряжения σ_{zz} независимо от условий волочения знакопеременны. Однако неравномерность распределения σ_{zz} при волочении со скоростью 5 м/с и коэффициенте трения $f=0,05$ (рис. 6, а) достаточно высокая по сравнению со скоростью 8 м/с и $f=0,02$ (рис. 6, б).

Распределение напряжений σ_{zz} по поперечному сечению (рис. 6) в значительной мере зависит от параметров процесса волочения.

Распределение радиальных (σ_{rr}) и окружных ($\sigma_{\theta\theta}$) напряжений в очаге деформации показывает их приближенное равенство во всем объеме пластической зоны.

Характер изменения σ_{τ} вдоль пластической зоны, как и скорости деформации сдвига, зависит от геометрических условий волочения. Варьирование параметров процесса, которое приводит к изменению силовых условий на контакте с волокой, изменяет распределение касательных напряжений в пластической зоне.

Следует заметить, что силы трения на контакте оказывают большое влияние на схему напряженного состояния. Общий характер распределения продольных, радиальных и тангенциальных напряжений при волочении с граничным трением ($f=0,05-0,1$) такой же, как и при жидкостном трении. Повышенное влияние сил трения вызывает большой перепад в величине осевых напряжений σ_{zz} .

Анализ расчетов напряженного состояния показывает, что зона действия напряжений распространяется далеко за пределы геометрического очага деформации, практически на всю область заготовки. Силы контактного трения настолько велики, что продольные напряжения становятся растягивающими, а распределение касательных напряжений в очаге деформации сопровождается сменой знака.

Анализ рис. 7 показывает значительную неравномерность распределения интенсивности напряжений в поперечном сечении проволоки на выходе из волоки. Так как этот параметр эквивалентен значению сопротивления пластичес-

кой деформации стали, то можно сделать заключение о неравномерности упрочнения стали по поперечному сечению проволоки. Для снижения

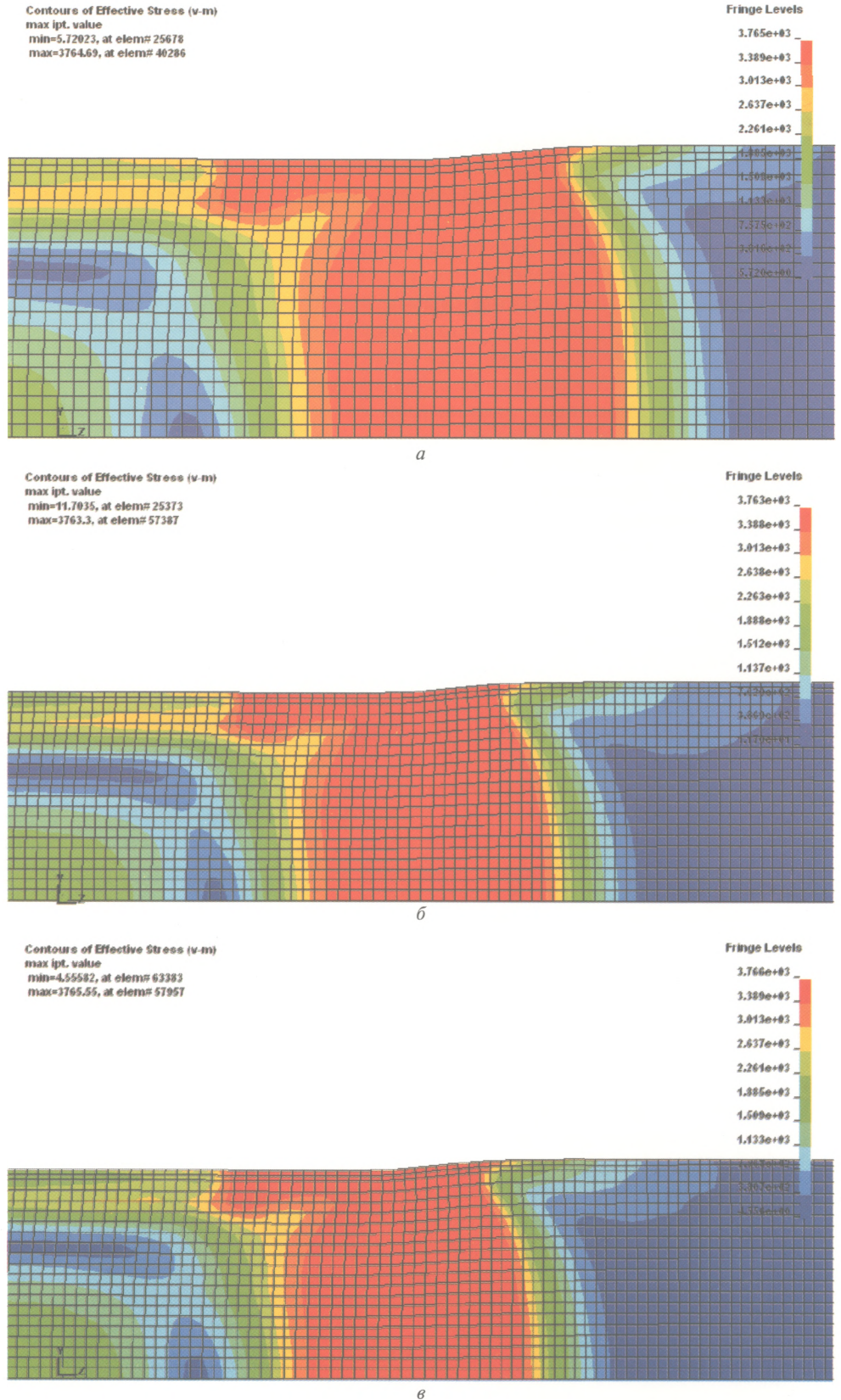


Рис. 7. Поле интенсивности напряжений σ_p , МПа, при волочении проволоки диаметром 0,467 мм со скоростью 3,892 м/с при коэффициенте трения 0,05 (а); со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,05 (б); со скоростью 6,227 м/с при коэффициенте трения 0,02 (в)

этой неравномерности можно уменьшать коэффициент контактного трения, а также оптимизировать геометрию волоочильного канала волоки.

Выводы

Произведен расчет напряженно-деформированного состояния и температурных полей с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для зон деформаций проволоки в волоках для действующей и новой технологий волочения проволоки диаметром 0,41 мм. Определено, что увеличение скорости волочения без дополнительных мероприятий не позволяет получить удовлетворительное качество стальной проволоки. Для увеличения скорости волочения без потери качества предложено снизить коэффициент контактного трения до 0,02. Анализ расчетных данных показал эффективность этого предложения для высокоскоростного волочения высокоуглеродистой проволоки. Определена значительная неравномерность рас-

пределения напряжений и деформаций в контактных и внеконтактных зонах очага деформации в волоках. Снижение контактного трения обеспечивает повышение равномерности указанных распределений.

Литература

1. Фетисов В.А. Деформационное старение стали при волочении проволоки. Мн.: Белоргстанкинпромиздат, 1996.
2. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1987.
4. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983.
5. Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2000.
6. Калачов М.И. Деформационное упрочнение металлов. Мн.: Наука и техника, 1980.
7. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.