

УДК 621.7.016.2-412:669.715

Скрябин С. А.  
Гулько И. В.**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА В ФАКТИЧЕСКОМ ОЧАГЕ  
ДЕФОРМАЦИИ ВАЛЬЦУЕМОЙ ЗАГОТОВКИ**

Разработка метода теоретического исследования течения металла и напряженного состояния в переходной и установившейся зонах фактического очага деформации, является дальнейшим развитием разработанного д-ром техн. наук Скрябиным С. А. теоретического метода исследования течения металла в очаге деформации при объемном деформировании [1, 2]. За основу при теоретическом исследовании процесса течения металла при объемном деформировании заготовок в калибрах, был взят метод, описанный в этих работах. Задача по исследованию решается поэтапно: упругая задача как первое приближение к упругопластической, упругопластическая задача для малых пластических деформаций. Характер перемещения металла в калибрах описан с помощью метода конечных разностей и переменного параметра.

Для решения объемной задачи по определению процесса течения металла в очаге деформации были приняты следующие условия [3]:

– в пластической области очага деформации изменение объема не происходит  $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$ .

– тензоры напряжений и деформаций для каждой точки деформированного слоя  $dz$ , рис. 1, имеют вид:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}; \quad T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}; \quad (1)$$

– напряженное состояние в каждой точке деформированной среды при пластических деформациях будет зависеть не только от девиаторной части тензора напряжений, но и от нормального октаэдрического напряжения:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_{cp} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{cp} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & -\sigma_{cp} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{cp} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{cp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_{cp} & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{cp} & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{cp} \end{pmatrix}$  – девиаторная часть тензора напряжений;

$\begin{pmatrix} \sigma_{cp} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{cp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{pmatrix}$  – шаровой тензор напряжений;

$\sigma_{cp}$  – нормальное октаэдрическое напряжение в точке.

- в каждом деформируемом слое  $dz$  очага деформации напряженное состояние характеризуется объемной схемой с тремя сжимающими напряжениями  $|\sigma_1| > |\sigma_2| > |\sigma_3|$ ;
- в пластической области очага деформации упругая составляющая пластической деформации не учитывается;
- в каждом деформируемом слое  $dz$  очага деформации пластическая деформация начинается только при достижении напряжения величины предела текучести;
- напряженно-деформированное состояние деформируемой среды подчиняется закону жесткопластического деформирования;
- процесс нагружения в каждой точке очага деформации характеризуется отсутствием поворота главных осей тензоров напряжений и деформаций;
- процесс нагружения в каждой точке очага деформации пропорционален величине возрастания тензора напряжений некоторому параметру, который в пластической области деформации равен удвоенной величине модуля сдвига второго рода, т. е.  $2G^*$ .

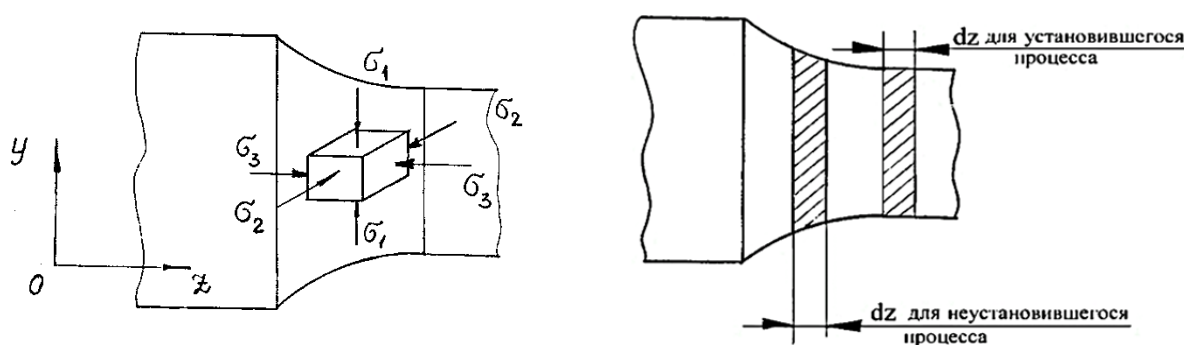


Рис. 1. Схема напряженного состояния в переходной зоне вальцуемой заготовки

Для установившегося процесса вальцовки, при объемном деформировании заготовки, тензор деформации  $\Gamma_\varepsilon$  будет иметь вид (1), т. к. в направлении координаты  $OZ$  имеются деформации удлинения  $\varepsilon_z$ , а, следовательно, и перемещения  $w$ .

При таком соотношении тензора деформации величина перемещения  $w$  для слоя  $dz$ , рис. 1, будет определяться формулой:

$$w = \varepsilon_z \cdot z. \quad (3)$$

Так как в направлении координаты  $OZ$  имеются деформации удлинения  $\varepsilon_z$ , следовательно, и перемещения  $w$ , эти компоненты определяются из обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x); \quad \varepsilon_z = \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y); \quad (4)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy},$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Получим:

$$w = \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)z, \quad (5)$$

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{E}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y). \quad (6)$$

После подстановки правой части равенства (6) в формулу (5) будем иметь:

$$w = \frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)z. \quad (7)$$

Используем геометрические соотношения (8):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad (8)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Получаем  $w$  – перемещения в слое, равном шагу сетки в направлении оси  $OZ$ :

$$w = \frac{\nu}{1-\nu} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) z. \quad (9)$$

Заменяя в формуле (9) частные производные их конечными разностями, получаем формулу для определения перемещений вдоль оси  $OZ$  переходного участка:

$$w = \frac{\nu}{1-\nu} \left( \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{+h_{\alpha 1}^i} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{+h_{\alpha 2}^i} \right) z. \quad (10)$$

Для определения течения металла при неустановившемся процессе вальцовки (переходной участок) используется описанная в работе [4] методика расчета с предварительной разбивкой переходного участка на ряд элементарных сечений  $dz$  (рис. 1), в каждом из которых процесс рассматривался как установившийся.

Значения  $u_{i,j}$  и  $v_{i,j}$  определяются по методу, описанному в работах [1, 2], рис. 2.

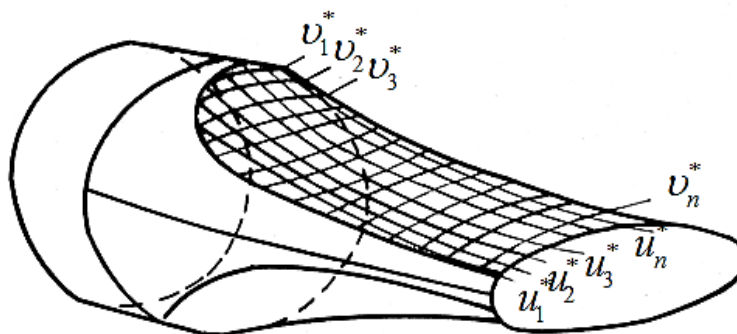


Рис. 2. Деформируемая площадь очага деформации

Неравномерность деформации и скорости перемещения металла по толщине заготовок при прокатке (вальцовке) неизбежно должна приводить к возникновению в фактическом очаге деформации неоднородного напряженного состояния.

Эксперименты по определению напряженного состояния проведены по методике, описанной в работе [5].

На рис. 3 представлена схема распределения напряжений  $\sigma$  в различных сечениях фактического очага деформации. При прокатке крупных заготовок (широкая толстая полоса) при значениях отношения начальной высоты заготовки  $H$  к диаметру валков  $D$  ( $H/D = 0,156-0,218$ ), степень деформации на первых переходах невелика и напряжения распределяются по сечениям крайне неравномерно. Контактная площадь, соответствующая нейтральному сечению, представляет собой зону прилипания.

Зона прилипания характеризуется объемным напряженным состоянием при всестороннем сжатии, т. е. напряжения сжатия действуют по всем направлениям, причем соотношение между ними таково, что пластическая деформация в этой зоне не происходит.

Сжимающие напряжения вызываются силами трения поверхности металла о валки, действующими не только на контактные, но и соседние, более глубоко расположенные слои. Образуется «непластичный клин» (показан пунктиром на рис. 3). Максимальные сжимающие

напряжения в этой зоне соответствуют максимуму удельного давления. Продольные напряжения в зоне прилипания распределяются по толщине полосы также неравномерно. За зоной прилипания идет область, в которой промежуточные слои металла испытывают наиболее интенсивные продольную и поперечную деформации.

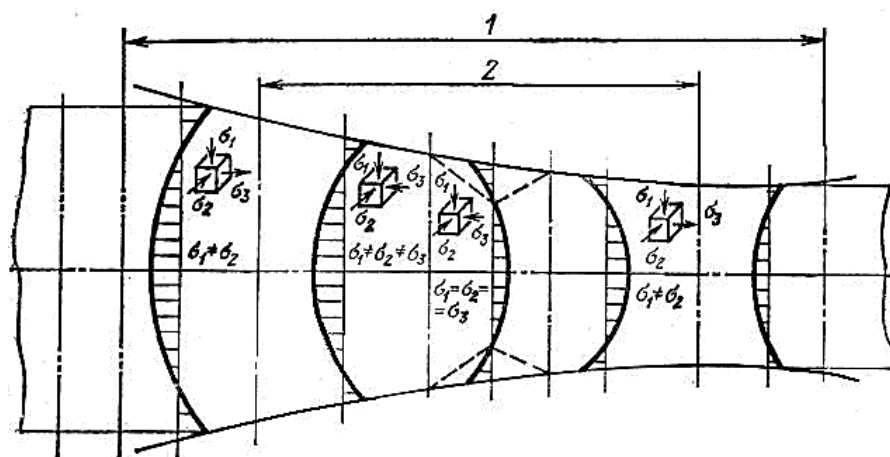


Рис. 3. Схема напряженного состояния в фактическом очаге деформации при прокатке широкой толстой полосы:

1 – фактический очаг деформации; 2 – геометрический очаг деформации

Под действием вертикальных сжимающих усилий на боковых гранях заготовки образуются выпуклости. Одновременно промежуточные слои, как было показано выше, опережают поверхностные и внутренние слои. Вследствие этого в промежуточных слоях создаются продольные растягивающие напряжения. Таким образом, в промежуточных слоях возникает неоднородное напряженное состояние, вызываемое одновременным действием вертикальных сжимающих и продольных растягивающих напряжений. Промежуточные слои металла, движущиеся с повышенной скоростью, тянут за собой внутренние слои, создавая в них также растягивающие напряжения.

В зоне возникновения неравномерности скоростей, быстрее перемещаются поверхностные слои и в них создаются продольные растягивающие напряжения.

В зоне отставания получают повышенную скорость промежуточные слои, увлекающие за собой внутренние слои, в результате чего продольные растягивающие напряжения распределяются по толщине полосы неравномерно.

Распределение напряжений при прокатке широкой тонкой полосы (отношение начальной высоты заготовки  $H$  к диаметру валков  $D$  ( $H/D < 0,156-0,218$ )) представлены на рис. 4, на котором видно, что в зоне прилипания преобладают сжимающие напряжения.

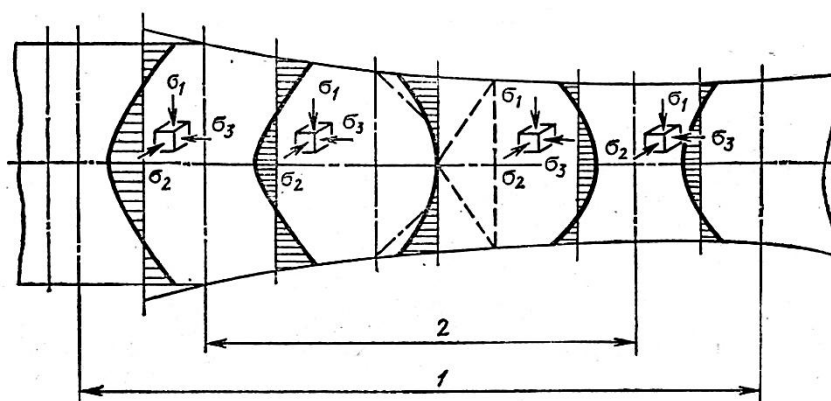


Рис. 4. Схема напряженного состояния в фактическом очаге деформации при прокатке широкой тонкой полосы:

1 – фактический очаг деформации; 2 – геометрический очаг деформации

Характер неравномерности распределения напряжений по сечению прокатываемого металла зависит в основном от условий прокатки и главным образом от степени обжатия. Кроме того, значительную роль играют пластичность деформируемого металла, однородность его структуры и равномерность механических свойств, коэффициент трения между заготовкой и валками, температура и скорость деформирования, а также соотношения геометрических размеров заготовки и валков.

На рис. 5 представлены значения среднего напряжения в поперечном сечении заготовки в очаге деформации, а на рис. 6 зависимость среднего напряжения в: середине заготовки (1); в месте соприкосновения заготовки с валками (2); во внеконтактных зонах (3) от температуры нагрева вальцовочных штампов в поперечном сечении середины геометрического очага деформации [6].

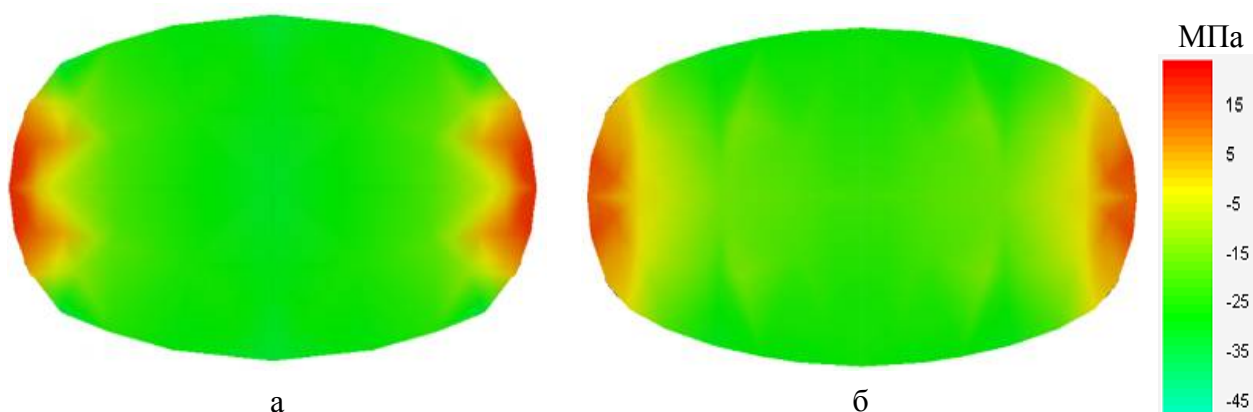


Рис. 5. Среднее напряжение поперечного сечения заготовки в очаге деформации, МПа (сплав АК6,  $\text{Ø}14 \times 150$  мм, степень обжатия 50 %; температура нагрева вальцовочных штампов (а) 20 °С, (б) 450 °С

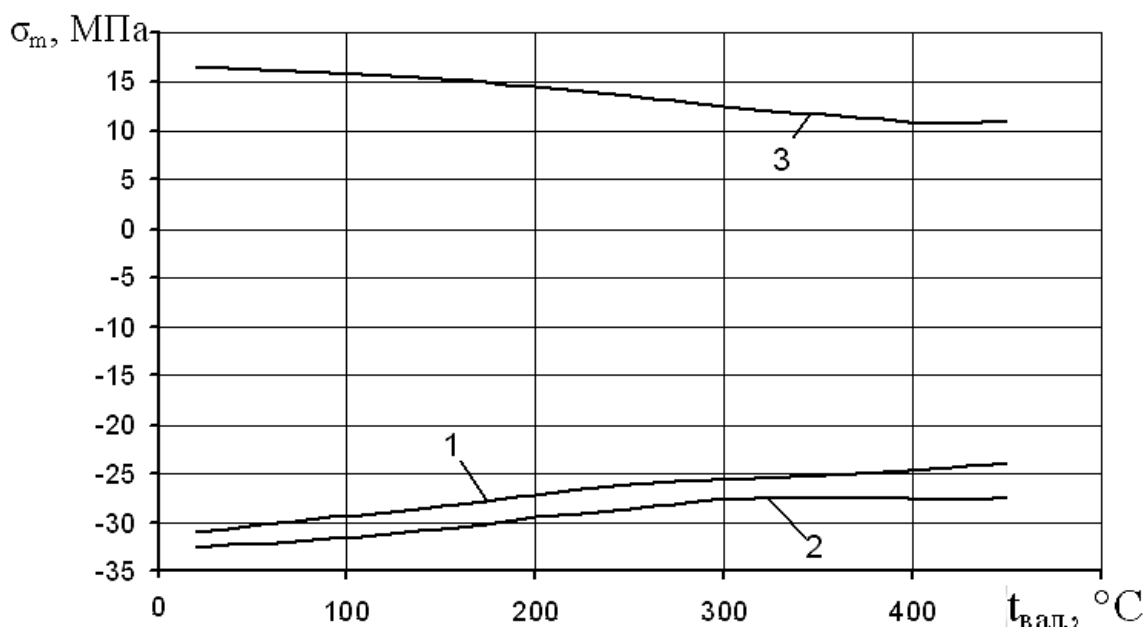


Рис. 6. Зависимость среднего напряжения в: середине заготовки (1); в месте соприкосновения заготовки с валками (2); во внеконтактных зонах (3) от температуры нагрева вальцовочных штампов в поперечном сечении середины геометрического очага деформации

Для проведения экспериментов и расчета калибров были применены рекомендации по изготовлению на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов [7].

## ВЫВОДЫ

Описаны и получили дальнейшее развитие теоретические и экспериментальные исследования течения металла в переходной и установившейся зонах при вальцовке заготовок в очаге деформации, при их объемном деформировании.

Представлен вывод формулы для определения перемещения металла для установившегося процесса вальцовки, при объемном деформировании заготовки.

Для определения течения металла при неустановившемся процессе вальцовки (переходной участок) используется методика расчета с предварительной разбивкой переходного участка на ряд элементарных сечений  $dz$ , в каждом из которых процесс рассматривается как установившейся.

Отмечено, что неравномерность деформации и скорости перемещения металла при прокатке (вальцовке) неизбежно должна приводить к возникновению в фактическом очаге деформации неоднородного напряженного состояния.

Установлено, что деформация в металле начинается еще до геометрической зоны деформации и протекает в определенной последовательности. Первыми начинают деформироваться поверхностные слои. Следовательно, деформация в прокатываемом металле начинается с контактных слоев и переходит в срединные.

Представлены значения среднего напряжения в поперечном сечении заготовки в очаге деформации; зависимость среднего напряжения в середине заготовки, в месте соприкосновения заготовки с валками, во внеконтактных зонах от температуры нагрева вальцовочных штампов в поперечном сечении середины геометрического очага деформации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрябин С. А. *Научное обоснование, исследование, разработка и внедрение малоотходных технологических процессов вальцовки заготовок из алюминиевых и титановых сплавов* : дис. д-ра техн. наук : 05.16.05 / С. А. Скрябин. – М. : МАТИ, 1990. – 438 с.
2. Скрябин С. А. *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах* / С. А. Скрябин. – Винница : А. Власюк, 2007. – 284 с.
3. Скрябин С. А. *Вальцовка заготовок из алюминиевых сплавов в условиях изотермического и приближенных к нему деформирования* / С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Л. В. Швец. – Винница : ПП «Едельвейс и К», 2010. – 136 с.
4. *Исследование течения металла при вальцовке заготовок в области малых упруго – пластических деформаций* / С. А. Скрябин, И. З. Степаненко, С. В. Комаров, В. Ф. Ганжа // *Технология легких сплавов*. – М. : ВИЛС. – 1978. – № 8. – С. 16–19.
5. Скрябин С. А. *Профилирование заготовок на ковочных вальцах* / С. А. Скрябин, А. И. Колташников. – М. : Машиностроение, 1988. – 224 с.
6. *QForm 3D – конечно-элементная программа для расчета процессов пластической деформации металлов и сплавов*, ©1991-2008, ООО «КванторФорм» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.qform3d.com](http://www.qform3d.com).
7. Гунько И. В. *Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов* / И. В. Гунько, С. А. Скрябин, Д. С. Чайка // *Обработка металлов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 134–138.

Скрябин С. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;

Гунько И. В. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: scriabin\_sa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2012 г.