

УДК 620.191.3

Ершов С. В.
Мостипан Е. Е.
Шкура В. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПО ДЛИНЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ В РАЗРЕЗНОМ КАЛИБРЕ

Применение теоретических методов расчета, позволяющих анализировать течение металла при прокатке в калибрах, предоставляет исследователям возможность использовать новые подходы и методики прогнозирования формоизменения поверхностных дефектов.

Создание методики анализа полученных расчетов деформированного состояния требует специальных исследований для определения взаимосвязи между поведением дефекта и распределением скорости течения металла в зоне его расположения.

Многие ученые, занимавшиеся исследованиями формоизменения поверхностных дефектов при прокатке, отмечали, что характер их формоизменения сильно зависит от схемы деформации в калибрах. Так в работах Ю. М. Чижикова [1], Ю. В. Зильберга [2, 3], В. Н. Ершова [4, 5] подчеркивается, что при прокатке в различных калибрах формоизменение дефектов носит принципиально различный, порой противоположный, характер.

В работе [6] было доказано, что существует связь между поперечной и вертикальной составляющими скорости течения металла в очаге деформации и глубиной поверхностного дефекта. Однако не была предложена методика анализа формоизменения поверхностных дефектов в зависимости от интенсивности течения металла в различных зонах очага деформации.

Целью работы является анализ формоизменения поверхностных дефектов в зависимости от интенсивности течения металла в различных зонах очага деформации. Определить критерии выбора поперечного сечения очага деформации наиболее точно характеризующего поведение дефекта.

Экспериментальные исследования в открытом разрезном калибре (рис. 1), где имелись зоны с различным характером течения металла.

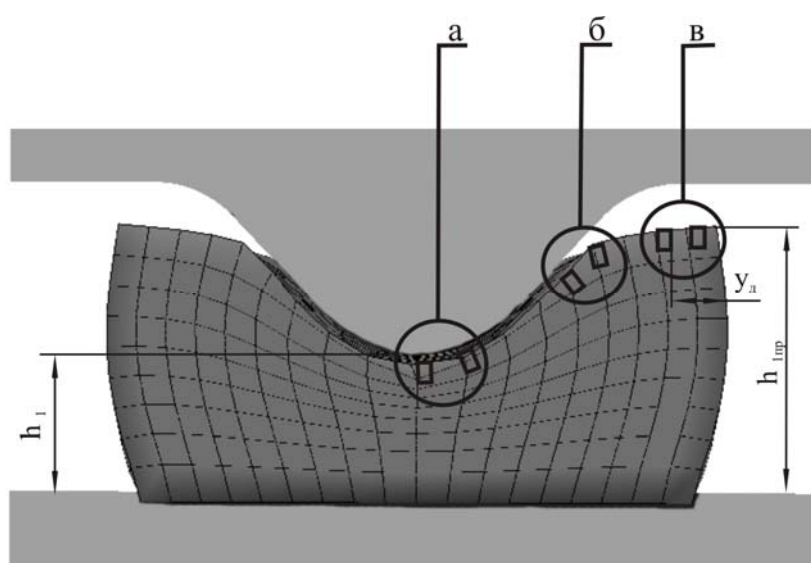


Рис. 1. Схема деформации прямоугольной полосы в разрезном калибре:

а – расположение дефектов при значении фактора $m_3 = y_\delta/b_0 = 0,42-0,48$; б – тоже при $m_3 = y_\delta/b_0 = 0,23-0,35$; в – $m_3 = y_\delta/b_0 = 0,10-0,21$

Прокатка велась на стане 300 прокатной лаборатории Днепродзержинского государственного технического университета. В качестве образцов использовались свинцовые заготовки сечением 20×40 мм, длиной 300 мм. Валки изготавливались из стали 45 без термической обработки. Размеры искусственных дефектов до и после прокатки измерялись при помощи инструментального микроскопа с точностью $\pm 0,005$ мм. Статистический анализ производился при помощи программного пакета «Statistica 6».

Было проведено три серии экспериментов прокатки в разрезном калибре, в ходе которых дефекты располагались в зонах с разным характером течения металла: зона непосредственно обжимаемая гребнем (рис. 1, а), зона не обжимаемая гребнем, где происходит утяжка высоты профиля (рис. 1, б) и зона где наблюдается эффект наплыва (рис. 1, в).

Размеры дефектов до прокатки представлены на рис. 2. После прокатки измерялись: высота правой $h_{1прд}$ и левой $h_{1лд}$ стенок дефекта, ширина по дну $b_{1дн}$ и по верху дефекта $b_{1в}$.

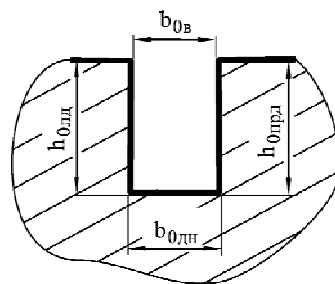


Рис. 2. Геометрические параметры дефекта

Эксперименты проведены для следующего диапазона значений исследуемых факторов:

– коэффициент обжатия $m_1 = h_0/h_1 = 1,14 - 2,0$;

– коэффициент формы дефекта $m_2 = h_{0лд}/b_{0дн} = 1,0 - 2,0$;

– коэффициент положения дефекта $m_3 = y_д/b_0 = 0,10 - 0,48$,

где h_0 , h_1 – начальная и конечная высота полосы; b_0 – начальная ширина полосы; $h_{0лд}$, $b_{0дн}$ – начальная высота и ширина искусственного дефекта; $y_д$ – расстояние от правого края полосы до правой стенки дефекта.

Подробно анализ экспериментальных данных изложен в работах [7, 8].

Теоретический расчет выполнялся при помощи программного пакета «ESV Deform», который в качестве математического аппарата использует метод конечных элементов для аппроксимации полей скоростей течения металла и вариационный принцип механики сплошных сред. Вариационное уравнение, использовавшееся для расчета методом штрафных функций имеет вид:

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0, \quad (1)$$

где μ – условная вязкость металла; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_τ и v_τ – полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S ; t_1 – штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости; $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ – скорость относительного изменения объема; t_2 – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости; v_n – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке; ω_n – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

Общая методика моделирования изложена в работе [9].

Расчет был выполнен для условий прокатки в разрезном калибре, которые полностью соответствовали условиям прокатки лабораторных образцов. Сетка конечных элементов строилась так, что бы узловые точки элементов поверхностного слоя соответствовали узловым точкам искусственно нанесенного на станке дефекта (рис. 3).

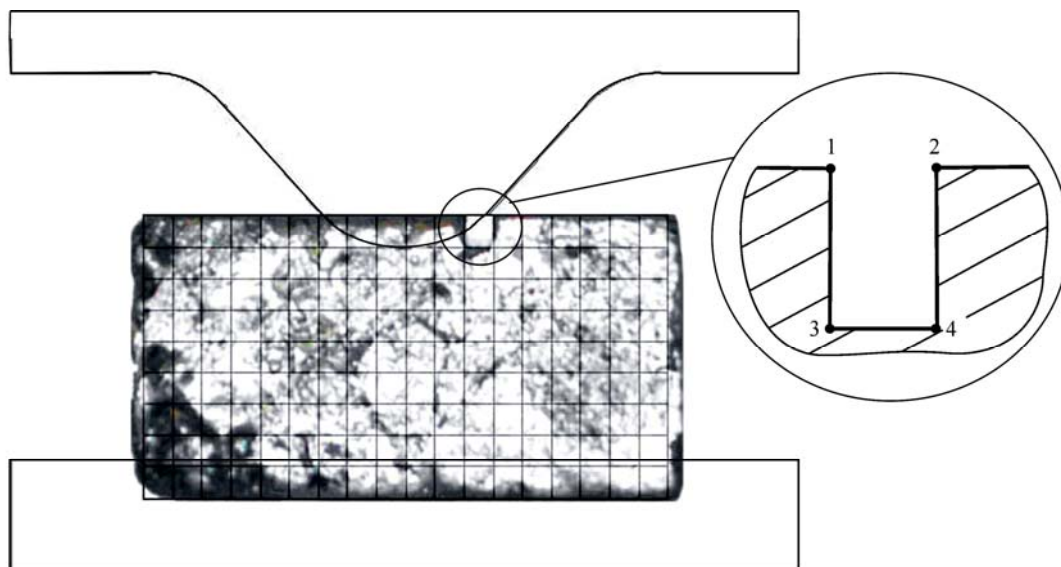


Рис. 3. Совмещение изображений поперечного сечения экспериментального образца с нанесенным поверхностным дефектом и сетки конечных элементов

Значения глубины левой и правой стенок дефекта после деформации сопоставлялись с безразмерными величинами dV_y/V_e и dV_z/V_e , характеризующими разницу между значениями поперечной и вертикальной составляющих скорости течения металла на поверхности полосы и на глубине соответствующей глубине дефекта.

К примеру, величины характеризующие изменение глубины левой стенки дефекта можно определить так:

$$\frac{dV_y^{h_{1,л0}}}{V_e} = \frac{V_{y1} - V_{y3}}{V_e}, \quad \frac{dV_z^{h_{1,л0}}}{V_e} = \frac{V_{z1} - V_{z3}}{V_e}, \quad (2)$$

где V_e – линейная скорость вращения валков;

V_{y1}, V_{z1} – поперечная и вертикальная составляющие скорости течения металла в точке 1 (см. рис. 3)

V_{y3}, V_{z3} – поперечная и вертикальная составляющие скорости течения металла в точке 3 (см. рис. 3)

Величины dV_y/V_e и dV_z/V_e сопоставлялись со значениями глубины левой и правой стенок дефекта в сечениях, расположенных на протяжении всего очага деформации. Положение поперечного сечения, где выполнялись сопоставления, определялись коэффициентом k_n :

$$k_n = \frac{x}{ld} = 0,00 \div 1,00, \quad (3)$$

где x – расстояние от сечения входа в очаг деформации, до исследуемого сечения, ld – длина очага деформации (рис. 4). Таким образом, $k_n = 0$ характеризует сечение входа в очаг деформации, $k_n = 1$ – сечение выхода из очага деформации.

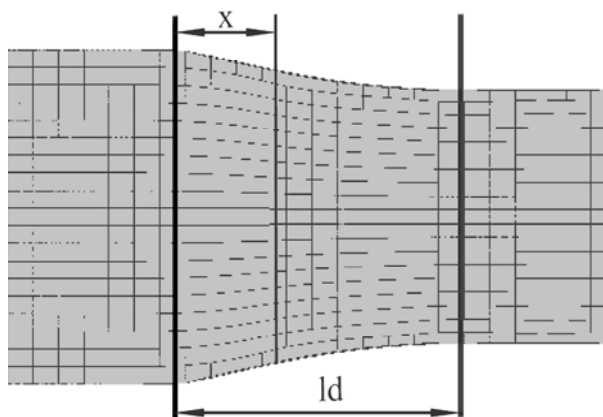


Рис. 4. Определение исследуемого сечения

Исследуемые сечения для случая $m_1 = h_0/h_1 = 2,00$ на протяжении всего очага деформации приведены на рис. 5.

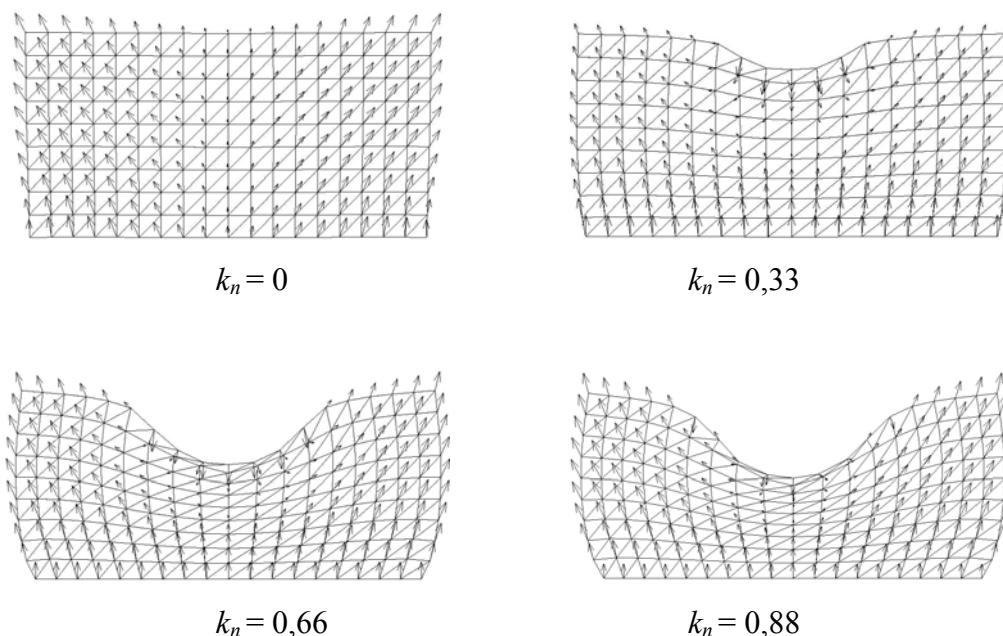


Рис. 5. Векторный вид поля скоростей течения металла в поперечных сечениях очага деформации

При наблюдаемом неравномерном течении металла формоизменение поверхностных дефектов, попавших в разные зоны профиля, будет зависеть от скорости перемещения металла в этой зоне. Исследования, приведенные в работе [6] показали, что в зонах, где течение металла будет менее интенсивным, менее интенсивным будет и формоизменение дефектов, а в зоне с более интенсивным течением металла, наблюдается большее формоизменение дефектов. Но какое сечение на протяжении очага деформации будет характеризовать определяющую величину изменения глубины дефекта?

Точный ответ на вопрос о степени влияния скорости течения металла в различных сечениях на формоизменение дефектов может дать статистический анализ связи поперечной и вертикальной составляющих скорости течения металла и коэффициента изменения глубины поверхностных дефектов.

После статистического анализа удалось определить связь между безразмерными величинами dV_y/V_e и dV_z/V_e и коэффициентом изменения глубины левой ($h_{1л0}/h_{0л0}$) стенки

дефектов в различных сечениях по всей длине очага деформации (табл. 1). Так же в таблице приведены средние значения интенсивности скорости деформации (H_{cp}) в поверхностном слое каждого рассмотренного сечения.

Таблица 1

Результаты статистического анализа

k_n	Коэффициенты корреляции между $h_{1л\partial}/h_{0л\partial}$ и $\Delta V_y/V_\epsilon$ и $\Delta V_z/V_\epsilon$		H_{cp} , 1/с
	$\Delta V_y/V_\epsilon$	$\Delta V_z/V_\epsilon$	
0,00	- 0,15	- 0,05	5,00
0,11	- 0,31	0,64	12,97
0,22	- 0,42	0,73	23,61
0,33	- 0,64	0,79	31,15
0,44	- 0,63	0,77	34,47
0,55	- 0,24	0,71	30,73
0,66	- 0,31	0,51	30,84
0,77	- 0,12	0,49	27,57
0,88	- 0,30	-0,01	24,01

Из табл. 1 видно, что наибольшие значения коэффициентов корреляции между параметрами дефекта и скоростью течения металла наблюдаются на участке длинны очага деформации $k_n = 0,33 \div 0,44$, и эти же сечения соответствуют наибольшим H_{cp} в поверхностном слое.

Можно сделать вывод, что наиболее адекватно изменение глубины поверхностных дефектов будут отражать составляющие скорости течения металла, взятые в сечении очага деформации с наибольшим значением H_{cp} .

Для сечения $k_n = 0,44$, которое наиболее точно характеризует формоизменение дефекта, получены регрессионные зависимости параметров поверхностного дефекта после прокатки от безразмерных величин $\Delta V_y/V_\epsilon$ и $\Delta V_z/V_\epsilon$.

Уравнение регрессии для параметра $h_{1л\partial}/h_{0л\partial}$ имеет вид:

$$h_{1л\partial}/h_{0л\partial} = 0,749 - 0,018 \cdot \frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} + 0,0099 \cdot \frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} - 0,0004 \cdot \left(\frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} \right)^2 + 0,000054 \cdot \left(\frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} \right)^2.$$

Коэффициент множественной корреляции для этого уравнения равен 0,82, что говорит о высокой степени достоверности полученной зависимости.

Уравнение регрессии для параметра $h_{1нр\partial}/h_{0нр\partial}$ имеет вид:

$$h_{1нр\partial}/h_{0нр\partial} = 0,6531 - 0,0326 \cdot \frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} + 0,0079 \cdot \frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} - 0,00093 \cdot \left(\frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} \right)^2 + 0,00003 \cdot \left(\frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} \right)^2.$$

Коэффициент множественной корреляции для этого уравнения равен 0,78.

Для параметра $b_{1\partialн}/b_{0\partialн}$ уравнение регрессии имеет вид:

$$b_{1\partialн}/b_{0\partialн} = 0,7302 - 0,035 \cdot \frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} - 0,0038 \cdot \frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} + 0,00046 \cdot \left(\frac{\Delta V_y}{V_\epsilon} \right)^2 + 0,000065 \cdot \left(\frac{\Delta V_z}{V_\epsilon} \right)^2.$$

Коэффициент множественной корреляции для этого уравнения равен 0,95.

Для параметра $b_{1\sigma}/b_{0\sigma}$ уравнение регрессии имеет вид:

$$b_{1\sigma}/b_{0\sigma} = 0,7704 + 0,0087 \cdot \frac{DV_y}{V_{\sigma}} + 0,0202 \cdot \frac{DV_z}{V_{\sigma}} - 0,0014 \cdot \left(\frac{DV_y}{V_{\sigma}} \right)^2 - 0,00021 \cdot \left(\frac{DV_x}{V_{\sigma}} \right)^2.$$

Коэффициент множественной корреляции для этого уравнения равен 0,80.

ВЫВОДЫ

Установлено, что существует сильная связь между интенсивностью течения металла и глубиной поверхностного дефекта после прокатки (коэффициент множественной корреляции 0,82). В случае прокатки в открытом разрезном калибре эта связь наиболее выражена на участке $k_n = 0,33 \div 0,44$ по длине очага деформации, где интенсивность течения металла в поперечном и вертикальном направлениях наиболее высока.

Результаты показывают, что при анализе калибровок валков с точки зрения их способности к выкатыванию поверхностных дефектов, для получения адекватных результатов, необходимо выполнять анализ течения металла в сечениях, характеризующихся наибольшими средними значениями поперечной и вертикальной составляющих скорости течения в поверхностном слое металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чижиков Ю. М. Влияние формы и размеров исходного слитка на качество поверхности железнодорожных рельсов / Ю. М. Чижиков, С. Е. Кондрашин // *Сталь*. – 1972. – № 11. – С. 1009–1111.
2. Зильберг Ю. В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке / Ю. В. Зильберг // *Сталь*. – 1997. – № 10. – С. 44–46.
3. Зильберг Ю. В. Изменение поверхностных дефектов при прокатке трубной заготовки из коррозионностойкой стали / Ю. В. Зильберг, М. М. Родман, С. В. Ревякин, Е. А. Боровенский // *Сталь*. – 1991. – № 10. – С. 33–36.
4. Исследование глубины и характера залегания дефектов на металле в группе 500 цеха Блюминг-1 с целью выбора оптимальной конструкции устройства зачистки дефектов в потоке стана и разработки конструкции опытно-промышленной установки : Отчет о НИР / Днепродзержиский индустриальный институт им. М. И. Арсеничева. – Днепродзержинск, 1972. – 67 с.
5. Разработка, промышленное испытание, освоение и исследование способа зачистки поверхностных дефектов металла в потоке НЗС цеха Блюминг-1 Криворожского металлургического завода: Отчет о НИР / Днепродзержиский индустриальный институт им. М.И. Арсеничева. – Днепродзержинск, 1972. – 67 с.
6. Ершов С. В. Теоретическое исследование трансформации поверхностных дефектов при прокатке в условиях неравномерной деформации / С. В. Ершов, Г. В. Левченко, Е. Е. Мостипан // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2008. – № 17. – С. 161–166.
7. Ершов С. В. Экспериментальное исследование трансформации поверхностных дефектов при прокатке в разрезном калибре / С. В. Ершов, Е. Е. Мостипан // *Теория и практика металлургии*. – 2008. – № 1. – С. 35–39.
8. Ершов С. В. Экспериментальное исследование влияния технологических факторов на трансформацию поверхностных дефектов при прокатке в условиях неравномерной деформации / С. В. Ершов, Е. Е. Мостипан, Н. А. Демина // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 201–205.
9. Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2. / Б. М. Илюкович, А. П. Огурцов, Н. Е. Нехаев, С. В. Ершов. – Днепропетровск : РИА «Днепро-ВАЛ». – 2002. – 485 с.

Ершов С. В. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;
Мостипан Е. Е. – ассистент ДГТУ;
Шкура В. С. – магистр ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,
г. Днепродзержинск.

E-mail: omd@dstu.dp.ua