

*В.Н. Кадыков, А.А. Уманский, Ю.А. Мартьянов*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В СОРТОВЫХ КАЛИБРАХ

**Аннотация.** В лабораторных условиях проведены исследования формоизменения дефектов при прокатке квадратных заготовок в сортовых калибрах различной формы. Установлены качественные и количественные зависимости выработки дефектов в процессе прокатки от следующих факторов: степени деформации, расположения и пространственной ориентации дефектов на исходной заготовке. Раскрыт механизм влияния формы и размеров используемых при прокатке калибров на интенсивность выработки поверхностных дефектов на заготовке.

**Ключевые слова:** поверхностные дефекты, моделирование, лабораторные эксперименты, калибры прокатных валков, деформация.

## STUDY OF SURFACE DEFORMATION DURING ROLLING OF THE BAR CALIBERS

**Abstract.** Studies of defects distortion during square billets rolling in various forms of bar calibers were held in laboratory conditions. Established are qualitative and quantitative dependences between defects forming during the rolling process and the following factors: the degree of deformation, the location and spatial orientation of the defects on the initial billet. The mechanism of the influence of the shape and the size used in calibers rolling on the intensity of generation of the billet surface defects is disclosed.

**Keywords:** surface defects, modelling, laboratory experiments, gagen mill rolls, deformation.

Одна из наиболее значимых характеристик качества сортового металлопроката – наличие на его поверхности дефектов, которые являются концентраторами напряжений и значительно ухудшают прочностные и пластические свойства проката в процессе его дальнейшей обработки и эксплуатации.

По происхождению поверхностные дефекты сортового металлопроката подразделяют на сталеплавильные, т.е. перешедшие на готовый прокат со слитков или непрерывнолитых заготовок, и прокатные – дефекты, возникающие непосредственно в процессе прокатки или при проведении вспомогательных операций в прокатных цехах (нагрев, отделка, термическая обработка). При этом дефекты прокатного происхождения могут переходить на поверхность сортового металлопроката с полученных в обжимном цехе заготовок или возникать непосредственно в процессе производства проката на сортовых станах.

Множеством исследований показано, что использование оптимальных режимов деформации при прокатке на сортовых станах не только способствует уменьшению риска возникновения новых дефектов, но при их применении создаются условия для выработки уже имеющихся дефектов на исходных заготовках. При этом в качестве основных факторов, оказывающих значимое влияние на интенсивность выработки поверхностных дефектов, выделяют: форму и размер используемых калибров, коэффициент вытяжки, месторасположение и ориентацию дефектов относительно направления прокатки.

Следует отметить, что в настоящее время мнения различных исследователей по вопросу количественной и качественной оценки влияния параметров калибровки и месторасположения дефектов на исходных заготовках на степень выработки поверхностных дефектов существенно разнятся.

По вопросу выбора оптимальных калибров с точки зрения повышения выкатываемости дефектов Ю.В. Зильберг в работе [1] дает рекомендации чередовать калибры, требующие кантовки на 45 и на 90°, а в работе [2] – использовать пару калибров ромб – квадрат. Г.С. Уткин [3] приводит данные об увеличении выработки поверхностных дефектов при переходе от прокатки в ящичных калибрах на прокатку в четырехвалковых калибрах по схеме квадрат – восьмигранник – квадрат. В.Н. Асановым [4] показано, что при переводе непрерывного стана 340/160 на прокатку по системе круг – гладкая бочка с предшествовавшей ей вытяжной системы овал – круг достигнуто улучшение качества поверхности готового проката. Полученные авторами работ [5, 6] регрессионные зависимости влияния параметров прокатки на степень выработки дефектов показывают различное по величине, а иногда и разнонаправленное влияние таких факторов, как месторасположение дефектов на заготовке и степень деформации при прокатке. Таким образом, отсутствие среди исследователей единого мнения по вопросу влияния режимов прокатки в калиброванных валках на качество поверхности металлопроката свидетельствует об актуальности проведения дальнейших исследований в этом направлении.

С целью установления закономерностей формоизменения дефектов в процессе деформации проведена опытная прокатка свинцовых образцов с искусственно нанесенными на их поверхность дефектами. Лабораторные исследования проводили на двухвалковом прокатном стане 80. Правомерность использования свинца в качестве модельного материала обусловлена тем, что пластичность свинца при комнатной температуре соответствует пластичности стали при температурах прокатки. Множеством исследований [1, 2, 5] показано, что использование свинцовых образцов для моделирования процессов прокатки стальных заготовок позволяет получать адекватные реальным процессам закономерности формоизменения дефектов. При проведении экспериментов использовались полученные отливкой в специальные формы образцы сечением 30×30 мм. Глубина и ширина дефектов составила соответственно 2 и 1 мм.

Образцы прокатывали в ящичном, ромбическом и овальном калибрах. Выбор схемы нанесения дефектов (рис. 1) производился из условия получения максимального количества информации о формоизменении дефектов в зависимости от их расположения.

В ходе проведения исследований анализировали влияние следующих факторов на интенсивность выработки дефектов: формы калибра, в котором производится деформация металла (ящичный, ромбический, овальный); коэффициента вытяжки; месторасположения дефекта на поверхности образца (на гранях или ребрах заготовки); пространственной ориентации дефектов относительно направления прокатки (продольные, поперечные, наклонные на угол 45°).

В качестве критерия интенсивности выработки дефектов приняли коэффициент выработки, определяемый из выражения

$$K_{\text{выр}} = \frac{H_{\text{д}0}}{H_{\text{д}1}},$$

где  $H_{\text{д}0}$  и  $H_{\text{д}1}$  – глубина дефектов соответственно до и после прокатки.

С целью уменьшения погрешности полученных данных по каждому варианту сочетания исследуемых факторов (формы калибра, коэффициента вытяжки, месторасположения и ориентации дефектов) прокатали по 5 образцов.

Значимость влияния вышеперечисленных параметров определяли с помощью стандартных методик дисперсионного и регрессионного анализов. Дисперсионный анализ использовали для определения значимости влияния дискретных факторов (формы калибра, месторасположения и пространственной ориентации дефектов), а регрессионный анализ – при оценке влияния на выработку дефектов коэффициента вытяжки.

В результате обработки полученных при проведении лабораторных экспериментов данных установлено значимое влияние на коэффициент выработки поверхностных дефектов всех исследуемых параметров.

Влияние формы калибра на выработку дефектов проявляется в том, что наиболее благоприятные условия для выкатываемости дефектов создаются при деформации в ромбическом калибре, а наименее благоприятные – при прокатке в овальном калибре. Так, при прочих равных условиях (одинаковые месторасположе-

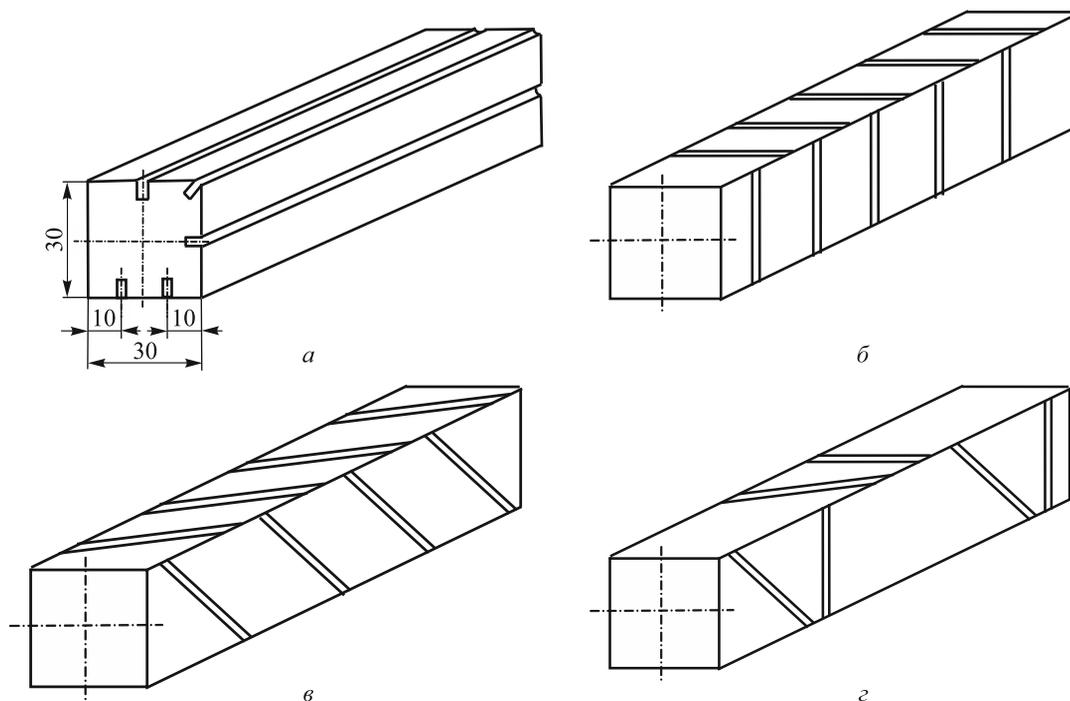


Рис. 1. Схема расположения на свинцовых образцах искусственных дефектов: а – продольных; б – поперечных; в – наклонных; г – поперечных и наклонных

ние и пространственная ориентация дефектов, коэффициент вытяжки) коэффициент выработки дефектов при прокатке в ромбическом калибре выше коэффициента выработки при прокатке в овальном калибре в среднем на 22 %, а по сравнению с прокаткой в ящичном калибре разница составляет 13 % (рис. 2).

Зависимость коэффициента выработки дефектов от формы калибра, используемого при прокатке, обусловлена различной неравномерностью распределения обжатий по ширине калибра. С увеличением неравномерности обжатий по ширине полосы возрастают дополнительные растягивающие напряжения, которые препятствуют закатыванию дефектов. С этой точки зрения наименее благоприятные условия для выработки дефектов создаются в овальном калибре (рис. 3), что и подтверждается экспериментально. Однако коэффициент выработки дефектов при прокатке в прямоугольном калибре ниже, чем в ромбическом несмотря на

более равномерное распределение обжатий в ящичном калибре (рис. 3). В этом случае на первый план выступает тот факт, что при прокатке в ромбическом калибре поверхностные слои раската в боковых зонах получают значительное горизонтальное смещение, что приводит к повышению выработки дефектов. В ящичном калибре горизонтальное смещение металла практически отсутствует по всей ширине заготовки, за исключением незначительных по протяженности участков выпуска калибра, где имеет место только вертикальное смещение металла в процессе деформации.

Касательно влияния коэффициента вытяжки на выработку поверхностных дефектов можно отметить ярко выраженный нелинейный характер полученных зависимостей для всех используемых калибров (рис. 2). При повышении коэффициента вытяжки с 1,05 до 1,09 увеличение интенсивности выработки дефектов происходит наиболее значительно, в интервале значений

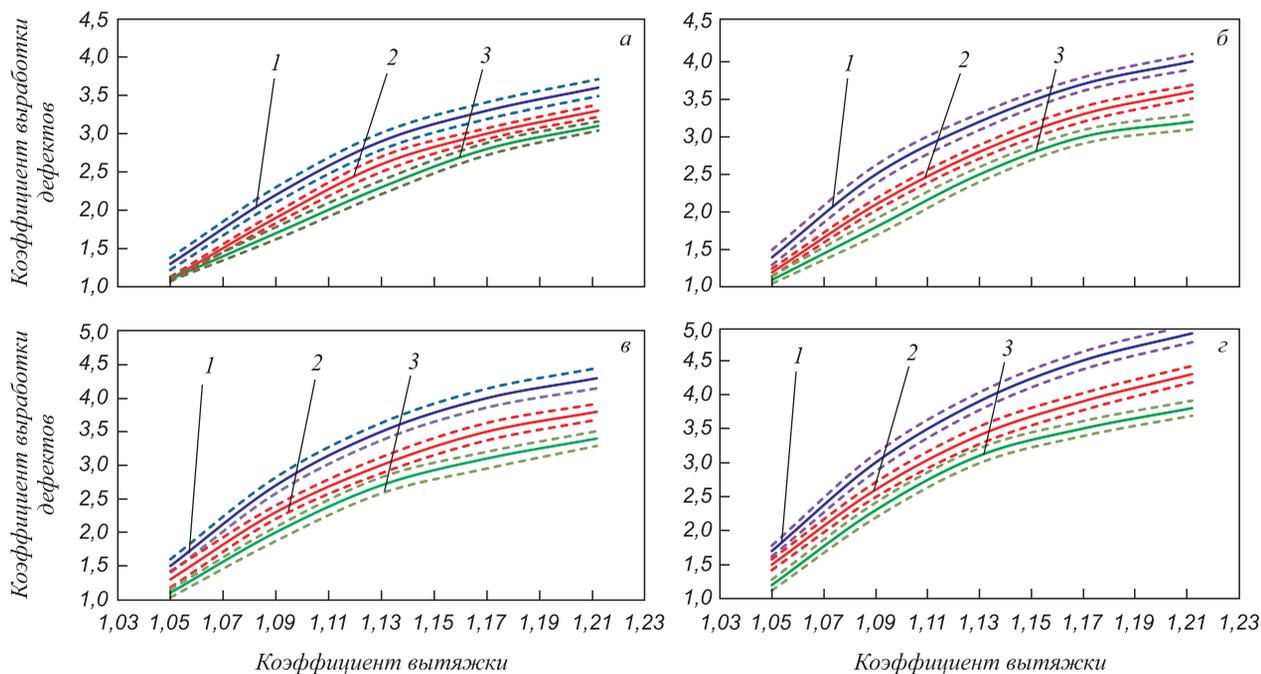


Рис. 2. Зависимость от коэффициента вытяжки при прокатке коэффициента выработки дефектов: а – поперечных; б – наклонных; в и г – продольных на гранях и на ребрах; 1, 2 и 3 – соответственно для ромбического, ящичного и овального калибров

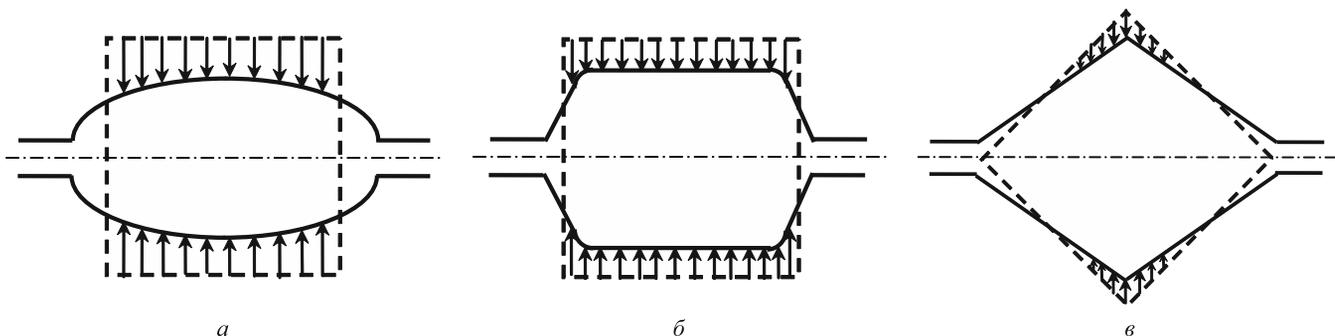


Рис. 3. Схема распределения обжатий по ширине калибра при прокатке квадратной заготовки: а – в ящичном; б и в – в овальном и в ромбическом калибрах

коэффициента вытяжки 1,09 – 1,17 повышение вытяжки раската уже не приводит к столь значимому увеличению степени выработки дефектов и, наконец, в интервале коэффициента вытяжки 1,17 – 1,21 увеличение вытяжки практически не сказывается на изменении интенсивности выработки поверхностных дефектов. Полученная картина объясняется прямой взаимосвязью коэффициента вытяжки раската с величиной обжатий заготовки при прокатке, которые в свою очередь определяют глубину проникновения деформации в тело заготовки. При малых обжатиях деформируются только приповерхностные слои раската, в результате чего деформация проникает в металл на меньшую глубину, чем глубина дефекта. Увеличение обжатий способствует интенсивному повышению выработки дефектов вплоть до момента, когда глубина проникновения деформации достигнет глубины дефекта. После этого момента интенсивность выработки дефектов с ростом степени деформации увеличивается не столь значительно.

Влияние пространственной ориентации дефектов относительно направления прокатки проявляется в том, что наиболее интенсивно вырабатываются продольные дефекты, а наименьшая выработка характерна для поперечных дефектов. Этот факт связан с наличием продольных растягивающих напряжений, возникновение которых на боковых участках верхней и нижней граней заготовок обусловлено большей вытяжкой осевых слоев раската по сравнению с приповерхностными. Наличие растягивающих продольных напряжений на указанных участках при прокатке толстых полос и полос средней толщины (с отношением длины дуги захвата к средней высоте полосы 0,3 – 0,5 и 0,5 – 1,5 соответ-

ственно), а также вышеуказанные причины их возникновения впервые показаны А.П. Чекмаревым [7].

Влияние расположения дефектов на степень их выработки в процессе прокатки проявляется прежде всего в том, что дефекты, нанесенные на ребра заготовки, вырабатываются в среднем на 11 % интенсивнее, чем дефекты, расположенные на гранях. Полученные данные согласуются с результатами промышленных экспериментов, проведенных авторами работ [8, 9], и данными других исследователей [1, 6]. Неравномерная выработка дефектов в зависимости от их месторасположения обусловлена тем, что при прокатке в центральной зоне калибра металл получает только вертикальное смещение, а в боковых зонах калибра имеет место одновременное перемещение поверхностных слоев раската в горизонтальном и вертикальном направлениях.

По вопросу влияния расположения дефектов на интенсивность их выработки также следует отметить, что продольные дефекты на концевых участках раската не только не вырабатываются, но наоборот имеет место увеличение их размеров – раскрытие дефектов (рис. 4, а). Причем протяженность зон раскрытия дефектов меньше на входном конце раската по отношению к противоположному концу. Раскрытие дефектов на концевых участках заготовки связано с отсутствием одной из внешних зон при прокатке, а различная протяженность зон раскрытия дефектов на входном и противоположном ему концах раската объясняется неравномерностью течения металла.

Кроме того, установлено, что на прилегающих к боковым участкам поверхности зонах раскрываются расположенные в них поперечные и наклонные к оси



а



б

Рис. 4. Раскрытие поверхностных дефектов после прокатки:  
а – продольных дефектов; б – поперечных и наклонных дефектов

прокатки дефекты (рис. 4, б). Объяснением этому факту служит то, что продольные растягивающие напряжения на ребрах заготовок имеют наибольшую величину.

**Выводы.** Наиболее благоприятные условия для выработки поверхностных дефектов на квадратной заготовке создаются при использовании ромбических калибров, а наихудшие результаты с точки зрения выкатываемости дефектов в процессе прокатки получены при деформации в овальных калибрах. Зависимость интенсивности выработки поверхностных дефектов от коэффициента вытяжки имеет ярко выраженный нелинейный характер для всех используемых калибров, что связано с изменением соотношения глубины проникновения деформации в образец с глубиной залегания дефекта. Месторасположение дефектов оказывает значительное влияние на коэффициент их выработки при деформации. Коэффициент выработки дефектов зависит от их ориентации относительно направления прокатки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зильберг Ю.В., Ревякин С.В. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1996. № 8. С. 23 – 25.
2. Зильберг Ю.В., Родман М.М., Ревякин С.В., Боровенский Е.А. // Сталь. 1991. № 10. С. 33 – 36.
3. Уткин Г.С., Резвов Б.С., Храмцов В.В. и др. // Производство проката. 2004. № 4. С. 18 – 22.
4. Асанов В.Н., Стеблов А.Б., Тулупов О.Н., Ленартович Д.В. // Сталь. 2008. № 11. С. 90, 91.
5. Перетягко В.Н., Рогов Ю.Е., Журавлев Б.К., Нефедов В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 26 – 29.
6. Егоров В.Д., Тимофеев В.В., Зудов Е.Г. и др. // Сталь. 1995. № 1. С. 32 – 34.
7. Теория прокатки крупных слитков / А.П. Чекмарев, В.Л. Павлов, В.И. Мелешко, В.А. Токарев. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.
8. Мартьянов Ю.А., Кадыков В.Н., Уманский А.А. – В кн.: Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Сб. тр. всерос. научно-практич. конф. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. С. 69 – 73.
9. Кадыков В.Н., Мартьянов Ю.А., Уманский А.А. // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2011. Вып. 27. С. 132 – 136.

© 2013 г. В.Н. Кадыков, А.А. Уманский,  
Ю.А. Мартьянов  
Поступила 23 ноября 2012 г.

УДК 669.162:669.046.516

*А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин*

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова (г. Днепропетровск)

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖФАЗНОЙ РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ ВДУВАЕМЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОВШОВОМ РАФИНИРОВАНИИ ЧУГУНА

**Аннотация.** Обоснованы основные условия диспергирования и деления вдуваемых двухфазных магнийсодержащих потоков в железоуглеродистые расплавы. Показано, что за счет гидроаэродинамических режимов и условий инжектирования двухфазных потоков величина межфазной массообменной поверхности в расплаве может быть увеличена на 40 – 50 %. Обоснованы условия вдувания магния в расплав через многосопловые фурмы с обеспечением лучшего его усвоения и увеличения интенсивности подачи магния в расплав.

**Ключевые слова:** магний, чугун, десульфурация, инжектирование, погружаемые фурмы.

## THE RELATIONSHIP OF INTERPHASE INNER SURFACE WITH THE PARAMETERS OF THE ISSUED STREAMS IN LADLE REFINING OF IRON

**Abstract.** Justified by the basic conditions of dispersion and division of injected two-phase flows in magnesium iron melts. It is shown that due to hydro-aero modes and conditions of two-phase flow injection quantity of the interphase mass transfer surface of the melt can be increased by 40 – 50 %. Substantiates injection of magnesium in hot metal a lance with a lot of nozzles providing a better learning and increase its flow rate of magnesium in the melt.

**Keywords:** magnesium, iron, desulphurization, injection, immersion lance.

Практически все процессы инжекционного ковшового рафинирования железоуглеродистых расплавов связаны с созданием в жидкой ванне развитой и активной тепло- и массообменной зоны, в объеме которой образуются и всплывают пузыри, а также различного

типоразмера газовые полости, содержащие инжектирующий газ и частицы рафинирующего реагента. На поверхности этих газовых полостей и в приграничной зоне расплава протекает комплекс физико-химических процессов, обеспечивающих его рафинирование.