

УДК 621.75.06 -52

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МАКРОСТРУКТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ В ЛИНИИ МНЛЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРОКАТКЕ*

Смирнов Е.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии и металловедения

Скляр В.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения

Смирнов О.Е.², магистр

Белевитин В.А.³, д.т.н. профессор кафедры автомобильной техники, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам

Пивоваров Р.Е.¹, аспирант

¹ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ «МИСиС»
 (309516, Россия, Старый Оскол, м-н им. Макаренко, 42)

² Ченстоховский технический университет
 (42200, Польша, Ченстохова, ул. Домбровского, 69)

³ Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
 (454074, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 69)

Аннотация. Наиболее значимой тенденцией последних десятилетий в области непрерывной разливки стальных слитков является частичный перенос процесса деформационного воздействия на него из области полного затвердевания (прокатный стан) в зону двухфазного (твердо-жидкого) состояния (технологическая линия МНЛЗ). Однако реализация подобной двухступенчатой деформации непрерывнолитого слитка приводит к необходимости изменения методологии физического моделирования поведения дефектов (поверхностных и объемных) в процессе последующей прокатки и, в первую очередь, в части правильного выбора их геометрической формы и пространственной ориентации. В работе представлены результаты исследования влияния фактора пространственной ориентации дефектов поверхности и макроструктуры металла осевой области (сплошности) деформированной в линии МНЛЗ сортовой заготовки с использованием слоистых физических моделей. Экспериментальное исследование выполнено применительно к условиям деформирования редуцированной непрерывнолитой заготовки по двум схемам прокатки с масштабам моделирования 1:5. Работа проводилась в гладких вальцах, имитирующих процесс бескальбровой прокатки применительно к условиям первых двух клетей обжимной группы непрерывного среднесортного стана 300, а также в первой и второй парах прямоугольных калибров обжимной клетки стана 500/370 ПАО «Донецкий металлопрокатный завод». Учитывая многовариантность решаемой задачи, была разработана универсальная конструкция физической модели, позволяющая имитировать пространственное расположение как поверхностных, так и внутренних дефектов. Проведенные исследования показывают, что в случае прокатки физических моделей с коэффициентом вытяжки более 2,0 и углом несоосности дефектов-имитаторов, близким к 60°, возможно их полное «залечивание». В свою очередь, уменьшение угла до 30° способствует большей вытяжке дефектов-имитаторов и лишь незначительному уменьшению их ширины. В случае полной несоосности дефектов-имитаторов (угол 90°) наблюдается лишь уширение дефектов и их осаживание до начальной длины после кантовки на 90°. Полученные экспериментальные данные позволили разработать представления о механизмах «залечивания» дефектов сплошности металла в зависимости от величины суммарной вытяжки, угла несоосности продольной оси дефекта с направлением прокатки, а также от удаленности их залегания по отношению к продольно-поперечной плоскости симметрии.

Ключевые слова: деформация, сортовая прокатка, непрерывнолитая заготовка, калибр, клеть, физическая модель, процесс «залечивания», дефекты макроструктуры.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-399-406

Наиболее значимой тенденцией последних десятилетий в области непрерывной разливки стальных слитков является частичный перенос процесса деформационного воздействия на него из области полного затвердевания (прокатный стан) в зону двухфазного (твердо-жидкого) состояния (технологическая линия МНЛЗ).

* Данная работа выполнена в рамках гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям социально-экономического развития Белгородской области за счет средств областного бюджета Белгородской области, номер проекта – 2015.01.5.

Анализ литературных данных показал, что история изучения процесса деформирования непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) насчитывает не более пятидесяти лет [1]. Изучение данного процесса (с различных сторон) позволило перевести его из плоскости исследований в плоскость реального промышленного использования с весьма хорошими результатами [2]. Однако, несмотря на столь значительные результаты, которые были достигнуты при реализации процесса деформационного воздействия на НЛЗ в области неполного затвердевания, актуальность вопросов, связанных с

изучением поведения как поверхностных, так и внутренних дефектов, в этом случае не уменьшилась.

Состояние поверхности НЛЗ зависит от большого числа факторов, среди которых температура и характер ее распределения по поверхности играют одну из главенствующих ролей. Однако, исходя из основных положений теории прокатки [3], для предотвращения образования дефектов или развития последних, имеющих ярко выраженные сталеплавильные генетические признаки, равномерность температуры на поверхности НЛЗ во время обжата имеет особенно важное значение [4]. Следует особо отметить, что в ряде случаев эта проблема решалась путем установки перед деформирующим оборудованием подогревательных печей, в которых происходило выравнивание температуры поверхности НЛЗ [5].

Деформационное воздействие на НЛЗ в зоне двухфазного (твердо-жидкого) состояния приводит к весьма существенной неравномерности распределения вытяжки по сечению. В работе [5] показано, что при деформировании НЛЗ сечением 140×140 мм в заготовку сечением 105×105 мм вытяжка в центральных (и прилегающих к ним) слоях значительно больше, чем вблизи поверхности и достигает максимального значения 3 (суммарный коэффициент вытяжки составлял 1,8). Это объясняется тем, что температура в центральной части слитка значительно выше, чем вблизи поверхности.

В свете вышеизложенного, особое место занимают вопросы, связанные с формой и пространственной ориентацией как поверхностных, так и внутренних (макροструктурных) дефектов НЛЗ после деформационного

воздействия в линии МНЛЗ. Данные работы [6] позволили сделать вывод о том, что приложение внешнего деформационного воздействия будет как трансформировать форму поперечного сечения поверхностных дефектов в сторону треугольной, так и уменьшать величину угла разориентации их продольных осей по отношению к оси прокатки. При этом поведение внутренних дефектов макроструктуры авторами не исследовалось.

В методическом плане, по мнению авторов, необходимую информацию о поведении внутренних дефектов макроструктуры могут дать появившиеся в последние годы публикации о попытках деформирования сортовой заготовки в тянуще-правильном агрегате (ТПА) [7, 8]. Опубликованные результаты имеют весьма неоднозначный характер.

В свете вышеизложенного, в условиях сортовой МНЛЗ ПАО «Электросталь» (г. Курахово) [9] был воспроизведен эксперимент по деформированию сортовой заготовки сечением 125×125 мм (рис. 1) в ТПА при наличии в ней незакристаллизовавшейся осевой области. Обжатие заготовки осуществляли за счет перемещения верхнего приводного ролика.

Анализ макротемплетов деформированной в ТПА сортовой заготовки показал, что во внутренних слоях возникают трещины, перпендикулярные продольной оси. При минимальных обжатиях $\Delta h = 2 - 3$ мм трещины носят односторонний характер (со стороны прижимного ролика, рис. 1, б) и, в большинстве случаев, классифицируются как дефекты, вызванные неправильной работой ТПА [10]. Приложение разового абсолютного

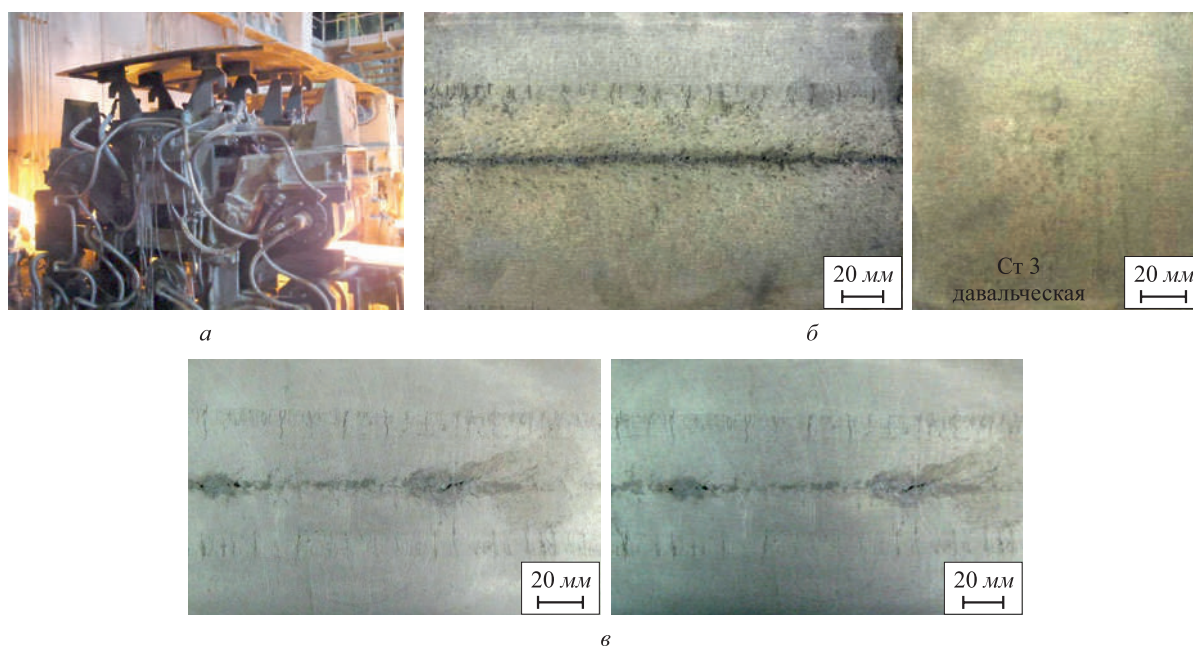


Рис. 1. Макроструктура непрерывнолитой заготовки из стали S235 сечением 125×125 мм после деформирования в ТПА: а – внешний вид ТПА; б – обжатие 2 – 3 мм; в – обжатие 7 мм

Fig.1. The macrostructure of billets of S235 steel with 125×125 mm section after deformation in straightening and withdrawal unit (SWU): а – general view of SWU; б – applied reduction of 2 – 3 mm; в – applied reduction of 7 mm

обжатия $\Delta h = 7$ мм привело к тому, что трещины стали носить двухсторонний характер (рис. 1, в). Вместе с тем дефекты, расположенные вблизи продольной оси симметрии деформированной в ТПА сортовой заготовки, приобрели вытянутую форму, а их продольная ось имеет угол рассогласования с продольной осью заготовки. Отмеченное однозначно свидетельствует о том, что приложение деформационного воздействия к кристаллизующейся заготовке в линии МНЛЗ приводит, с одной стороны, к частичной трансформации вида дефектов, а с другой обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение влияния пространственной ориентации внутренних дефектов макроструктуры на возможность их «залечивания» при последующей прокатке закристаллизовавшейся заготовки.

Целью работы являлось исследование влияния пространственной ориентации дефектов поверхности и сплошности макроструктуры металла осевой области деформированной в линии радиальной МНЛЗ сортовой заготовки с использованием физических моделей.

В ходе проведения исследований изучалось поведение двух типов дефектов, а именно: дефект сплошности макроструктуры металла осевой области – одиночная вытянутая пора или цепочка вытянутых пор, разделенных тонкими перемычками (в дальнейшем принималась как единая вытянутая пора значительной длины) и дефект поверхности – риска, имеющая *V*-образное поперечное сечение.

В качестве методики исследования был принят подход, базирующийся на создании в объеме физической

модели искусственной поры (ее вид соответствует вышеописанному), а на поверхности риски *V*-образного поперечного сечения. Принятая форма сечения дефекта-имитатора ранее описана в работе [11] и в наибольшей степени соответствует данным работы [6]. В качестве базовой информации о форме и характере пространственной ориентации дефектов в предварительно деформированной в линии МНЛЗ сортовой заготовки принимались результаты экспериментального исследования, выполненного в условиях ПАО «Электросталь» [12].

Эксперимент проводили применительно к условиям деформирования редуцированной непрерывнолитой заготовки по двум схемам прокатки с масштабом моделирования 1:5:

- в гладких валках, имитирующих процесс бескальбровой прокатки [13, 14], применительно к условиям первых двух клеток обжимной группы непрерывного среднесортного стана 350 ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» [15];

- в первой и второй парах сопряженных прямоугольных калибров обжимной клетки стана 500/370 ПАО «Донецкий металлопрокатный завод».

Учитывая многовариантность решаемой задачи, была разработана универсальная конструкция слоистой физической модели из свинца с литой структурой, позволяющая имитировать пространственное расположение как поверхностных, так и внутренних дефектов, а также учитывающей особенности структуры натурной непрерывнолитой заготовки (рис. 2).

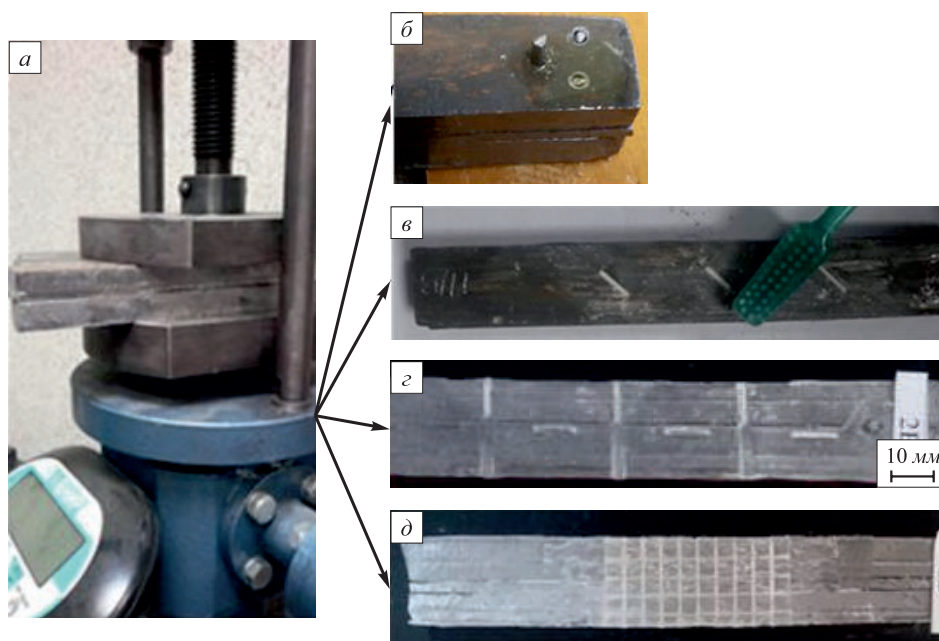


Рис. 2. Вид и стадии изготовления универсальных слоистых физических моделей со штифтовым соединением: а – сборка и подпрессовка образца для выравнивания; б – установка штифтов; в, г – нанесение дефектов-имитаторов; д – нанесение координатной сетки

Fig. 2. The type and stages of production of universal laminar physical models with pin connection: а – assembling and pre-pressing of the sample for alignment; б – pins mounting; в, г – drawing of defects-simulators; д – drawing of the grid

В усовершенствованную конструкцию физической модели были внесены следующие изменения:

- дефекты-имитаторы наносились на обе плоскости осевой пластины толщиной 3 мм. При выбранном масштабе внешняя плоскость пластины будет располагаться на внешней условной границе зоны равноосной «недендритной» структуры;
- ось дефектов-имитаторов не совпадала с продольной осью физической модели. В ходе эксперимента углы несоосности принимали равным 300, 450 и 600;
- на верхнюю и нижнюю поверхности физической модели наносились дефекты-имитаторы, ось которых или совпадала с продольной осью физической модели, или была перпендикулярна ей;
- на боковую поверхность физических моделей с помощью специальной матрицы наносилась координатная сетка.

Дефекты наносились шириной 5, 10 и 15 мм. Глубина дефектов колебалась в пределах от 0,75 до 1,8 мм. Пластины соединялись между собой с использованием штифтового соединения. Однако последующая прокатка физических моделей со штифтовым соединением в калибрах показала их недостаточную прочность (расслоение образца во время прокатки). Данное обстоятельство потребовало перехода на слоистые физические модели, соединенные методом пайки сплавом Вуда [16, 17].

В дальнейшем физические модели (рис. 3) были прокатаны на лабораторном стане 100, после чего их разъединяли и производили повторный обмер размеров дефектов-имитаторов. Результаты обработки первичных данных по формоизменению дефектов-имитаторов

при прокатке в гладких валках представлены на рис. 4 в виде зависимостей относительного изменения их ширины ϵ_b и длины ϵ_l от величины угла рассогласования между их продольной осью и осью прокатки.

Анализ полученных результатов показал, что при деформировании физических моделей в сопоставимых по суммарному коэффициенту вытяжки условиях ($\mu_\Sigma \leq 1,3$) относительные коэффициенты деформации дефектов-имитаторов в системе прямоугольных калибров (прокатка за два прохода при приложении однонаправленной деформации без кантовки на 90°) существенно выше, чем в случае прокатки в гладких валках (прокатка за три прохода при приложении разнонаправленной деформации за счет кантовки на 90° после второго прохода). В частности, в зависимости от угла несоосности продольных осей дефектов-имитаторов и продольной оси прокатки, такое превышение составило: по параметру ϵ_h – в 1,3 – 1,5 раза; по параметру ϵ_b – в 1,20 – 1,62 раза; по параметру ϵ_l – в 1,25 – 2,59 раза.

Однозначно установлено, что наличие угла несоосности вносит коррективы в механизм изменения ширины дефектов-имитаторов. В отличие от соосных дефектов-имитаторов, когда наблюдалась практически однонаправленная вытяжка с уменьшением ширины дефекта [11], наличие несоосности приводит, в большинстве случаев, не к уменьшению их ширины, а, наоборот, к увеличению за счет наличия продольных растягивающих напряжений. Особенно четко данный эффект проявляется в том случае, когда продольная ось дефекта перпендикулярна оси прокатки.

Говоря о возможности полной «выкатки» дефектов макроструктуры в первых проходах, можно утверж-

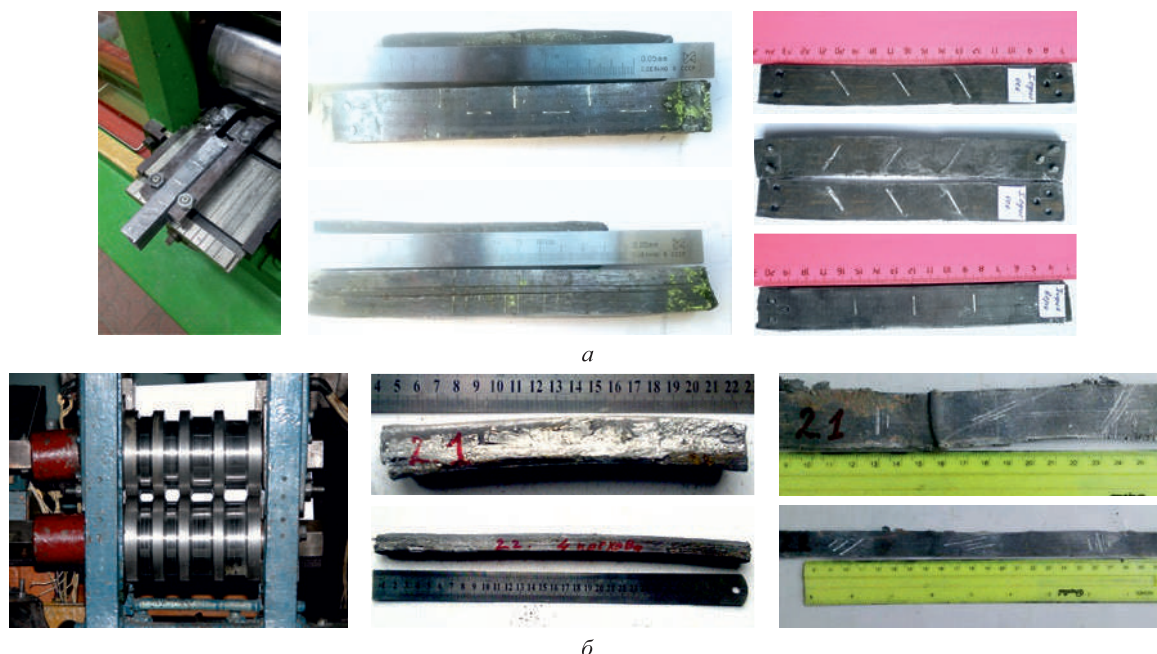


Рис. 3. Вид поверхностей физической модели после прокатки в гладких валках (а) и прямоугольных калибрах (б)

Fig. 3. Surfaces of the physical model after rolling in smooth rolls (a) and in rectangular grooves (b)

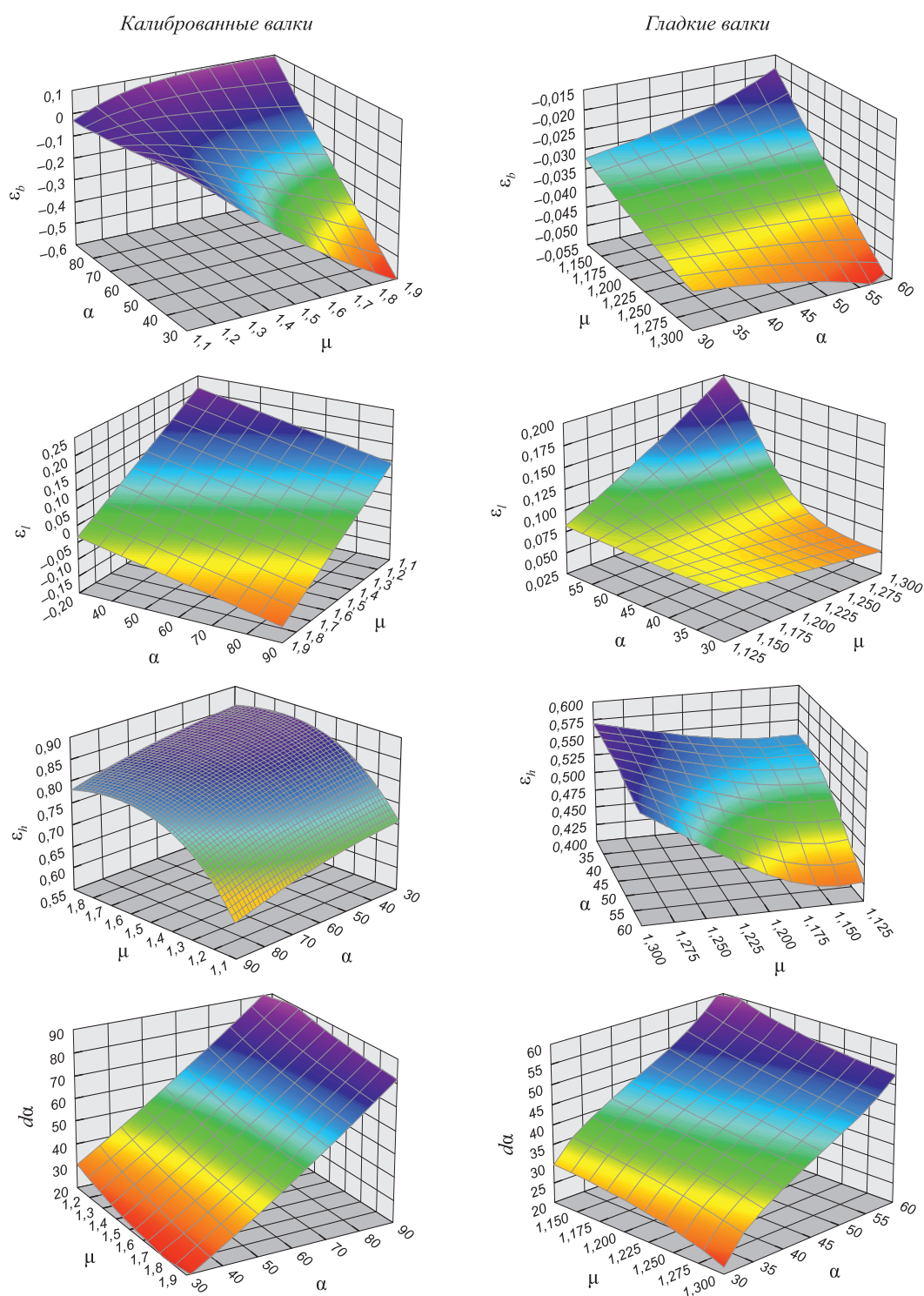


Рис. 4. Изменение относительных деформаций дефекта-имитатора (ε_h – глубины, ε_b – ширины, ε_l – длины) от угла рассогласования с осью прокатки α и величины вытяжки μ : после двух проходов кантовка на 90°

Fig. 4. The change in relative deformations of the defect-simulator (ε_h – depth, ε_b – width, ε_l – length) of the angle of misalignment with the rolling axis α and the elongation μ : with 90° rotation after 2 passes

дать, что данное условие достижимо при прокатке в системе прямоугольных вытяжных калибров при величине суммарной вытяжки $\mu_{\Sigma} \geq 2,0$ и наличии кантовок на 90° в используемой схеме прокатки. Реализация подобной схемы прокатки позволит ожидать уменьшения глубины дефектов на уровне не менее 90 %, а их

ширины – не менее, чем в 2,5 и более раз. При этом удлинение дефектов достигнет 90,6 – 95,6 % от величины суммарной вытяжки.

Что касается угла рассогласования оси дефекта-имитатора по отношению к оси прокатки, следует отметить, что при степени вытяжки $\mu_1 \leq 1,2$ величина

угла рассогласования остается неизменной. Однако, по мере дальнейшего увеличения вытяжки, угол рассогласования уменьшается в сторону соосности. В случае дефектов, ось которых перпендикулярна оси прокатки, наблюдается лишь незначительное отклонение оси от перпендикулярности. Однако ее величина соизмерима с величиной погрешности.

Последующая после кантовки на 90° прокатка за два прохода привела к существенному уменьшению угла рассогласования. Дефекты-имитаторы, которые имели базу 30° , стали иметь угол рассогласования не более 10° , а в случае дефектов-имитаторов с базой 60° – угол рассогласования уменьшается до 37° . Особого внимания заслуживает тот факт, что уменьшился угол рассогласования и в случае перпендикулярных дефектов. С физической точки зрения объяснение этому может быть дано только с позиции различия в величинах вытяжки разных слоев физической модели.

Характер формоизменения дефектов-имитаторов, расположенных на внешней условной границе зоны равноосной «недендритной» структуры, в целом соответствует вышеописанному для продольно-поперечной плоскости симметрии физической модели. Однако по абсолютной величине получаемые степени относительной деформации выше, что полностью объясняется характером распределения деформации по высоте физической модели [18]. Применительно к условиям прокатки в гладких валках (табл. 1) по параметру ε_b превышение не более 12 %, а по параметру ε_l – 16 – 21 %. Данные результаты не противоречат данным работы [19].

Оценка формоизменения дефектов-имитаторов на контактирующих с рабочим инструментом поверх-

ностях физических моделей была выполнена только применительно к условиям прокатки в гладких валках (табл. 2), поскольку после прокатки в калибрах корректно выполнить измерения размеров деформированных дефектов-имитаторов не удалось ввиду практически полной их «выкатки». В целом полученные результаты не противоречат имеющимся в литературе [18 – 20]. Из приведенных данных следует, что по мере роста величины суммарной вытяжки характер деформации дефектов-имитаторов становится одинаковым. При этом поперечные размеры уменьшаются более интенсивно, чем происходит их удлинение.

Выводы. Представлены результаты исследования влияния фактора пространственной ориентации дефектов поверхности и сплошности макроструктуры металла осевой области деформированной в линии МНЛЗ сортовой заготовки с использованием физических моделей. Использование слоистых моделей в совокупности с предложенной формой и способом нанесения дефектов на поверхность n -го слоя позволяет оценивать влияние степени деформации и фактора пространственной ориентации на процесс их «залечивания». Полученные экспериментальные данные позволили развить представления о механизмах «залечивания» дефектов сплошности металла в зависимости от величины суммарной вытяжки, угла несоосности продольной оси дефекта с направлением прокатки, а также от удаленности их залегания по отношению к продольно-поперечной плоскости симметрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tarmann B., Von Baar H. AIMI. Born // Steel Continuous processing. 1966. Vol. 21. P. 361.
2. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction in the continuous casting of billets // Millennium steel. 2007. P. 112 – 118.
3. Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки. – Донецк: УНИТЕХ, 2009. – 488 с.
4. Погорельский В.И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.
5. Saiga I., Fukuy K., Punakisiyo Yo. etc. The quality of the ingots obtained by combining continuous casting and rolling // Tetsu-To-Hagane. 1974. Vol. 60. No. 7. P. 990 – 999.
6. Peretyat'ko V.N., Mart'yanov Yu.A., Umanskii A.A., Fedorov A.A. Distortion of longitudinal defects in rolling on a continuous small-bar mill // Steel in translation. 2008. Vol. 38. No. 8. P. 599 – 602.
7. Smirnov Y., Sklyar V. Features of deformation of partly crystallization blooms at their two-stage soft reduction // Materials Science Forum. 2012. No. 704. P. 1 – 5.
8. Лубенец А.Н., Смирнов Е.Н., Щербачев В.В. Опыт производства судовых профилей из непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2002. № 8. С. 102 – 106.
9. Smirnov A.N., Khobta A.S., Serov A.I. etc. Casting of steel from the tundish of a continuous caster with a sliding gate // Russian Metallurgy (Metally). 2012. No.12. P. 1 – 5.
10. Cabai G., Cabai F. Continuous casting of steel. Some principles and practical notes. – STS s.r.l., 2010. – 112 p.
11. Smirnov Y.N., Sklyar V.A., Belevitin V.A. etc. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet // Steel in translation. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 325 – 328.
12. Смирнов Е.Н., Серов А.И., Скляр В.А. и др. Анализ качества металла непрерывнолитой сортовой заготовки из сталей 45 и

Таблица 1

Формоизменение дефектов-имитаторов на внешней условной границе зоны равноосной «недендритной» структуры при прокатке в гладких валках

Table 1. Forming of defects-simulators on the external boundary of the zone of equiaxed “non-dendritic” structure at rolling in smooth rolls

Коэффициент вытяжки, μ	Угол несоосности, α , град	Соотношение $\varepsilon'_b / \varepsilon_b^{1,2)}$	Соотношение $\varepsilon'_l / \varepsilon_l^{1,2)}$
1,142	30,0	$\frac{0,985 - 1,015}{1,000}$	$\frac{1,120 - 1,200}{1,160}$
1,159	45,0	$\frac{1,065 - 1,085}{1,075}$	$\frac{1,165 - 1,195}{1,180}$
1,277	60,0	$\frac{1,110 - 1,130}{1,120}$	$\frac{1,200 - 1,220}{1,210}$

¹⁾ ε'_b , ε'_l – относительное изменение ширины и длины дефекта-имитатора в плоскости условной границы зоны равноосной «недендритной» структуры.

²⁾ Числитель – минимальное и максимальное значение, знаменатель – среднее.

Формоизменение дефектов-имитаторов на контактирующих с рабочим инструментом поверхностях физических моделей при прокатке в гладких вальках

Table 2. Forming of the defects-simulators in contact with working tool surfaces of physical models at rolling in smooth rolls

Коэффициент вытяжки, μ	Среднее значение ε_b^{bb} и $\varepsilon_b^{nb\ 1)}$	Среднее значение ε_l^{bb} и $\varepsilon_l^{nb\ 1)}$	Соотношение ε_b^{bb} и $\varepsilon_b^{nb\ 2)}$	Соотношение ε_l^{bb} и $\varepsilon_l^{nb\ 2)}$
$\alpha = 90^\circ$ (поперечно-ориентированные дефекты)				
1,142	<u>0,373</u> 0,633	<u>0,037</u> 0,010	<u>0,583 – 0,595</u> 0,589	<u>3,515 – 3,885</u> 3,7
1,159	<u>0,223</u> 0,247	<u>0,176</u> 0,090	<u>0,863 – 0,943</u> 0,903	<u>1,847 – 2,053</u> 1,95
1,277	<u>0,770</u> 0,670	<u>0,100</u> 0,130	<u>1,089 – 1,209</u> 1,149	<u>0,738 – 0,800</u> 0,769
$\alpha = 0^\circ$ (продольно-ориентированные дефекты)				
1,142	<u>0,639</u> 0,657	<u>0,161</u> 0,170	<u>0,939 – 1,008</u> 0,974	<u>0,917 – 0,977</u> 0,947
1,159	<u>0,665</u> 0,690	<u>0,189</u> 0,200	<u>0,929 – 0,999</u> 0,964	<u>0,910 – 0,980</u> 0,945
1,277	<u>0,780</u> 0,790	<u>0,215</u> 0,220	<u>0,949 – 1,025</u> 0,987	<u>0,939 – 1,015</u> 0,977

¹⁾ ε_b^{bb} , ε_l^{bb} , ε_b^{nb} , ε_l^{nb} – среднее значение относительного изменения ширины и длины дефекта-имитатора в плоскостях контактирующих с верхним и нижним валком соответственно.

²⁾ Числитель – минимальное и максимальное значение, знаменатель – среднее.

У7 // Проблемы черной металлургии – 2015: Сб. тр. конф. – Череповец: ЧГУ, 2016. С. 40 – 47.

13. Бескалибровая прокатка сортовых профилей / Л.Е. Кандауров, Б.А. Никифоров, А.А. Морозов и др. – Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1998. – 128 с.
14. Janadzava T., Tanaka T., Noda A. etc. Development of grooved rolling // Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan. 1983. Vol. 22. No. 8. P. 710 – 715.
15. Крахт В.Б., Пратусевич А.Е., Шляхов Н.А. Повышение эффективности сортамента мелкосортно-среднесортного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината // Производство проката. 2003. № 5. С. 19 – 21.
16. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке. – Свердловск: Металлургиздат, 1956. – 287 с.

17. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Прокатка заготовки с одиночно расположенной в объеме порой // Заготовительное производство в машиностроении. 2009. № 11. С. 33 – 37.
18. Зильберг Ю.В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке // Сталь. 1997. № 10. С. 44 – 46.
19. Перетягко В.Н., Рогов Ю.Е., Журавлев Б.К. и др. Выработка поверхностных дефектов в ящичных калибрах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 26 – 29.
20. Уткин Г.С., Резвов Б.С., Храмов В.В. и др. Интенсификация выработки поверхностных дефектов при производстве заготовок // Производство проката. 2003. № 4. С. 10 – 20.

Поступила 20 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 5, pp. 399–406.

RESEARCH OF THE BEHAVIOR OF MACROSTRUCTURE DEFECTS OF THE PRE-DEFORMED CONTINUOUS CAST BILLETS DURING ROLLING

E.N. Smirnov¹, V.A. Sklyar¹, O.E. Smirnov², V.A. Belevitin³, R.E. Pivovarov¹

¹ Ugarov Sary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Sary Oskol, Belgorod Region, Russia

² Częstochowa University of Technology (CUT) (Politechnika Częstochowska), Częstochowa, Poland

³ South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The most significant trend in recent decades in the field of continuous casting of steel billets is a partial transfer of the process

of deformation of the exposure to the field of complete solidification (rolling mill) in the area of two-phase (solid-liquid) state (technological line of CCM). However, the implementation of such two-stage deformation of the continuous cast ingot leads to the need for changes to the methodology of physical simulation of the behavior of defects (surface and bulk) in the course of the subsequent rolling, first and foremost, in terms of the correct choice of their geometric shape and spatial orientation. The paper presents the results of a study of the influence of spatial orientation of the surface defects and continuity of the macrostructure of the metal axial region deformed in the line of the continuous casting machine using layered physical models. An experimental study performed in the conditions of deformation of reduced billets by two

schemes with rolling simulation scale 1:5: in smooth rolls, simulating the process of grooves rolling as applied to the first two stands of the crimp group of medium-section mill 300; in the first and second pairs of rectangular grooves of breakdown stand of the mill 500/370 of PJSC “Donetsk Metal Rolling Plant”. According to the multiplicity of the problem, the universal design of physical models was developed to simulate the spatial location of both surface and internal defects. Studies have shown that in case of rolling of physical models with extract ratio over 2.0 and an angle of misalignment defects imitators close to 60° their complete “healing” is possible. In turn, decrease in the angle to 30° contributes to greater extraction of the defect-simulator and only a small decrease in their width. In the case of total misalignment of defect-simulators (angle 90°) there is a broadening of the defects and their deposition to the initial length after tilting by 90°. The obtained experimental data allowed understanding of the mechanisms of “healing” defects integrity of metal depending on magnitude of the total extracts, the angle of misalignment of the longitudinal axis of the defect with the rolling direction and the distance of their occurrence from the longitudinal-transverse plane of symmetry.

Keywords: deformation, section rolling, billet, groove, stand, physical model, process of “healing”, defects of macrostructure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-399-406

REFERENCES

1. Tarmann B., Von Baar H. AIMI. Born. *Steel continuous processing*. 1966, vol. 21, pp. 361.
2. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction in the continuous casting of billets. *Millennium steel*. 2007, pp. 112–118.
3. Vasilev Ya.D., Minaev A.A. *Teoriya prodol'noi prokatki* [Theory of longitudinal rolling]. Donetsk: UNITEKh, 2009, 488 p. (In Russ.).
4. Pogorzhe'skii V.I. *Kontroliruemaya prokatka nepreryvnolitogo metalla* [Controlled rolling of continuous cast metal]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 151 p. (In Russ.).
5. Saiga I., Fukuy K., Punakisiy Yo. etc. The quality of the ingots obtained by combining continuous casting and rolling. *Tetsu-To-Hagane*. 1974, vol. 60, no. 7, pp. 990–999.
6. Peretyat'ko V.N., Mart'yanov Yu.A., Umanskii A.A., Fedorov A.A. Distortion of longitudinal defects in rolling on a continuous small-bar mill. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 8, pp. 599–602.
7. Smirnov Y., Sklyar V. Features of deformation of partly crystallization blooms at their two-stage soft reduction. *Materials Science Forum*. 2012, no. 704, pp. 1–5.
8. Lubenets A.N., Smirnov E.N., Shcherbachev V.V. Production of ship sections from continuous casting billets. *Stal'*. 2002, no. 8, pp. 102–106. (In Russ.).
9. Smirnov A.N., Khobta A.S., Serov A.I. etc. Casting of steel from the tundish of a continuous caster with a sliding gate. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, no. 12, pp. 1–5.
10. Cabai G., Cabai F. *Continuous casting of steel. Some principles and practical notes*. STS s.r.l., 2010, 112 p.
11. Smirnov Y.N., Skliar V.A., Belevitin V.A., Shmyglya R.A., Smirnov O.Y. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 5, pp. 325–328.
12. Smirnov E.N., Serov A.I., Sklyar V.A. etc. Analysis of the quality of continuous cast steel billets of steel 45 and U7 steel. In: *Problemy chernoi metallurgii – 2015: sbornik trudov konferentsii* [Problems of Ferrous Metallurgy – 2015: Proceedings of the Conference]. Cherepovets: ChGU, 2016, pp. 40–47. (In Russ.).
13. Kandaurov L.E., Nikiforov B.A., Morozov A.A. etc. *Beskalibrovaya prokatka sortovykh profilei* [Grooves rolling of section bars]. Magnitogorsk: Magnitogorskii dom pechati, 1998, 128 p. (In Russ.).
14. Janadzava T., Tanaka T., Noda A. etc. Development of grooves rolling. *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983, vol. 22, no. 8, pp. 710–715.
15. Krakht V.B., Pratushevich A.E., Shlyakhov N.A. Improving the efficiency of products of small-medium-section mill 350 at Oskol Electrometallurgical Plant. *Proizvodstvo prokata*. 2003, no. 5, pp. 19–21. (In Russ.).
16. Tarnovskii I.Ya., Pozdeev A.A., Lyashkov V.B. *Deformatsiya metalla pri prokatke* [Metal deformation during rolling]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1956, 287 p. (In Russ.).
17. Loginov Yu.N., Ereemeeva K.V. Rolling of the billet with a single pore located in the metal volume. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii*. 2009, no. 11, pp. 33–37. (In Russ.).
18. Zil'berg Yu.V. The study of regularities of forming of surface defects at rolling. *Stal'*. 1997, no. 10, pp. 44–46. (In Russ.).
19. Peretyat'ko V.N., Rogov Yu.E., Zhuravlev B.K., Nefedov V.M. The development of surface defects in box passes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 2, pp. 26–29. (In Russ.).
20. Utkin G.S., Rezvov B.S., Khramtsov V.V. etc. Intensification of the generation of surface defects at billets production. *Proizvodstvo prokata*. 2003, no. 4, pp. 10–20. (In Russ.).

Acknowledgements. This work was performed within the framework of the grant for carrying out research work on the priority areas of social and economic development of the Belgorod Region at the expense of the regional budget of the Belgorod Region, the project number is 2015.01.5.

Information about the authors:

E.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science”

V.A. Sklyar, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science”

O.E. Smirnov, MA Student

V.A. Belevitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Automotive Technics, Information Technologies and Teaching Methods of Technical Sciences

R.E. Pivovarov, Postgraduate

Received December 20, 2016