

УДК 621.77

Е. Н. СМІРНОВ* (д-р техн. наук, проф.),**В. А. БЕЛЕВИТИН**** (д-р техн. наук, проф.)

* - ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

** - Филиал Южно-Уральского государственного университета в
г. Кыштыме, Россия

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ БЛЮМОВ НА СТАДИИ НЕПОЛНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

На основании изложенных усовершенствований методики математической обработки экспериментальных данных, полученных с использованием метода координатных сеток, применительно к условиям процесса деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации выполнен комплекс расчетов кинематических параметров. Получены графические зависимости компонента вектора скорости течения металла V_x / V_0 и V_y / V_0 для различных значений управляющих факторов A_F , ε и θ .

непрерывнолитой блюм, кристаллизация, сталь, процесс деформации

С позиции предупреждения макроразрушений прокатываемого металла большое значение имеет не только деформированное, сколько напряженное состояние. Первым шагом по прогнозированию напряженного состояния является анализ изменения компонент вектора скорости течения деформируемого металла. При этом особую актуальность вышеназванные прогнозы приобретают в случае рассмотрения процессов деформирования раскатов (слитков, блюмов, заготовок и т.д.), для которых характерно наличие различного рода градиентов, как-то: теплового, агрегатного состояния и т.д. [1, 2]. Все вышесказанное в полной мере относится к процессу деформирования непрерывнолитых слитков (блюмов или заготовок) на стадии неполной кристаллизации [3, 4].

Определение кинематических параметров процесса пластического формоизменения, и в первую очередь компонент вектора скорости течения металла, сдерживается недостаточным развитием способов получения, интерпретации и обработки исходной экспериментальной информации в рамках используемых методов экспериментальной механики, особенно с позиции достигаемой точности и достоверности.

Как было показано в работах [5, 6], одним из способов повышения точности и достоверности результирующей информации о параметрах

пластического формоизменения является получение и интерпретация данных метода координатных сеток, а именно, функциональных зависимостей Эйлеровых координат x и y узлов первоначально прямоугольной координатной сетки в смешанном Эйлерово-Лагранжевом представлении. При этом, появляется возможность решения не только пространственных задач, но и их частных случаев – двухмерных, в плоскостях симметрии, на боковой грани.

С учетом вышеизложенного целью настоящей работы является исследование кинематических параметров процесса деформирования непрерывнолитых блюмов на стали неполной кристаллизации на основе дальнейшего усовершенствования методов математической обработки первичных экспериментальных данных.

Для вертикально-продольной плоскости симметрии (ВППС) получаемых недокатов с деформированной координатной сеткой деформации в направлении уширения отсутствуют. В этом случае для несжимаемой среды в условиях плоской деформации компоненты вектора скорости течения металла V_x, V_y, V_z могут быть вычислены через частные производные начальной (Лагранжевой) координаты Y по направлениям прокатки x и обжатия валков y соответственно $V_y = l/f_y$ и $V_x = -f_x/f_y$. Поскольку частная производная f_x функциональной зависимости $y = f(x, Y)$ представляет собой тангенс угла наклона α линий тока $Y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n – количество фиксированных линий тока в ВППС недоката), измерение угла наклона α линий тока $Y_i = \text{const}$ и представление их в виде $\alpha = \Theta(x, Y)$ или $\text{tg } \alpha = \Theta(x, Y)$ позволяет непосредственно из эксперимента получать значения частной производной f_x без дифференцирования $f_x(x, Y) = \text{tg } \alpha(x, Y) = \Theta(x, Y)$.

Это позволяет повысить точность расчета кинематических и статических параметров пластического формоизменения деформируемого металла, так как процесс дифференцирования, исключаемый в данном случае, является расходящимся, а измерение угла наклона α линий тока $Y_i = \text{const}, i = 1, 2, 3, \dots, n$ вместо их линейных координат x и y , отличается большей точностью.

Усовершенствования предложенного в работе [6] подхода, возможно также и в направлении вычисления компонент тензора скоростей деформаций T_ξ не только как функций

$$V_x = V_x(x, y); \quad (1 \text{ а})$$

$$V_y = V_y(x, y), \quad (1 \text{ б})$$

но и как сложных функций в представлении

$$V_x = F(x, Y); \quad (2 \text{ а})$$

$$V_y = \Phi(x, y), \quad (2 б)$$

а также

$$V_x = P(X, y); \quad (3 а)$$

$$V_y = G(X, y). \quad (3 б)$$

Такой подход позволяет определить компоненты тензора скоростей деформаций ξ_{xx} , ξ_{yy} , ξ_{xy} дифференцированием зависимостей (1 а) – (3 б).

Воспользовавшись в последствии условием несжимаемости

$$\operatorname{div} V = \xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = 0 \quad (4)$$

получаем выражения для вычисления компоненты ξ_{zz} тензора скоростей деформаций T_ξ для зависимостей (5 а) и (5 б):

$$\xi_{zz} = -(\xi_{xx} + \xi_{yy}) = F_y f_x / f_y - \Phi_y / f_y - F_x \quad (5)$$

и для зависимостей (3 а) и (3 б):

$$\xi_{zz} = -(\xi_{xx} + \xi_{yy}) = -(P_x / \varphi_x + G_x \varphi_y / \varphi_x + G_y). \quad (6)$$

В дальнейшем, с учетом весовых коэффициентов, назначаемых соответственно величинам накапливаемых ошибок, в результате вычислительных операций, значения компонент тензора скоростей деформации ξ_{xx} , ξ_{yy} , ξ_{zz} и ξ_{xy} могут быть определены как средневзвешенные величины соответствующих выражений.

Изложенные усовершенствования методики математической обработки экспериментальных данных КЭЛ-метода были внесены в программы расчета кинематических параметров деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации.

Для практической апробации изложенного подхода, как и в работе [7] было изготовлено в масштабе 1:10 две серии свинцовых образцов, моделирующих граничные условия деформации блюма сечением 335×400 мм. У образцов первой серии внутренняя полость заполнялась сплавом Вуда, а у образцов второй серии заполнение внутренней полости не производилось. Заполнение полости сплавом Вуда позволяет, с одной стороны, условно моделировать температурный градиент θ , а с другой – задавать прочностные свойства осевой жидко-твердой составляющей. Значение управляющего фактора A_f были выбраны теми же, что и в ходе экспериментальных исследований на пластилиновых физических моделях [8].

Полученные в результате обмера недокатов физических моделей из свинца с деформированной координатной сеткой, нанесенной на вертикально-продольную плоскость симметрии (ВППС), в дальнейшем обрабатывались с помощью компьютерной программы вычисления кинематических параметров, в основу которой был положен вышеизложенный подход.

Динамика изменения компонент вектора скорости течения деформируемого металла в продольном V_x и высотном направлениях V_y представлена на рисунках 1 - 3.

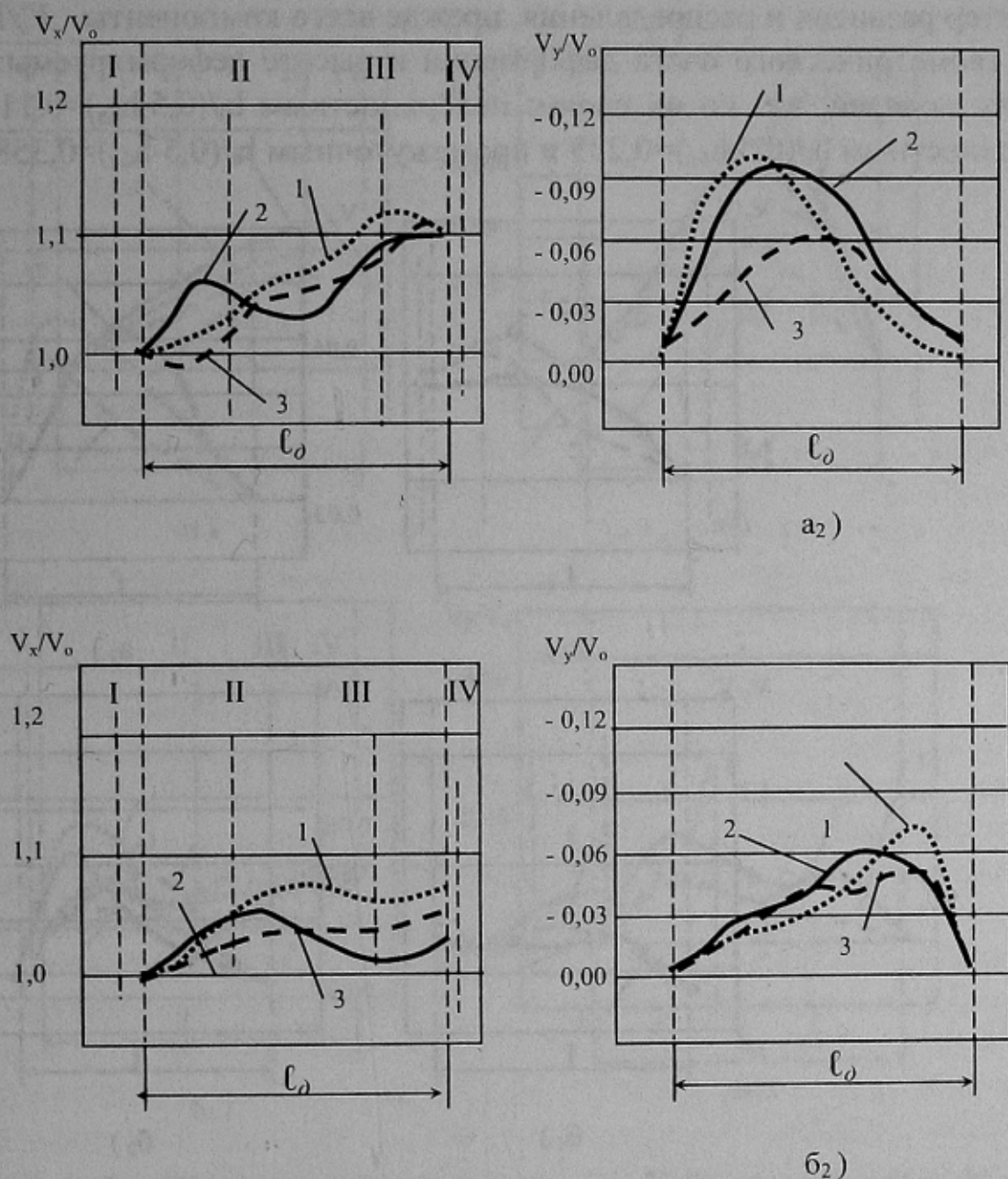


Рисунок 1 – Распределение продольных V_x/V_0 и высотных V_y/V_0 скоростей течения металла в вертикально-продольной плоскости симметрии физических моделей непрерывнолитого бляма с осевой зоной поллой (а) и заполненной сплавом Вуда (б) при $\varepsilon=0,051-0,054$ и $A_F=0,114$: 1 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$, 2 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$, 3 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$.

Данные зависимости представлены в относительных величинах V_x/V_0 и V_y/V_0 , где V_0 – скорость течения металла деформируемой заготовки

(физической модели непрерывнолитого блюма с жидкой сердцевинной) перед входом в фактический очаг деформации (заднего конца заготовки). Анализ показывает, что управляющий фактор $A_F = F_o/F$ в исследованном диапазоне $0,082 < A_F < 0,114$ оказывает весьма существенное влияние на характер развития и распределения, прежде всего компоненты V_x/V_o по длине геометрического очага деформации и высоте деформируемых физических моделей, т.е. по их слоям: поверхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,119$; подповерхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,239$ и промежуточным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,358$.

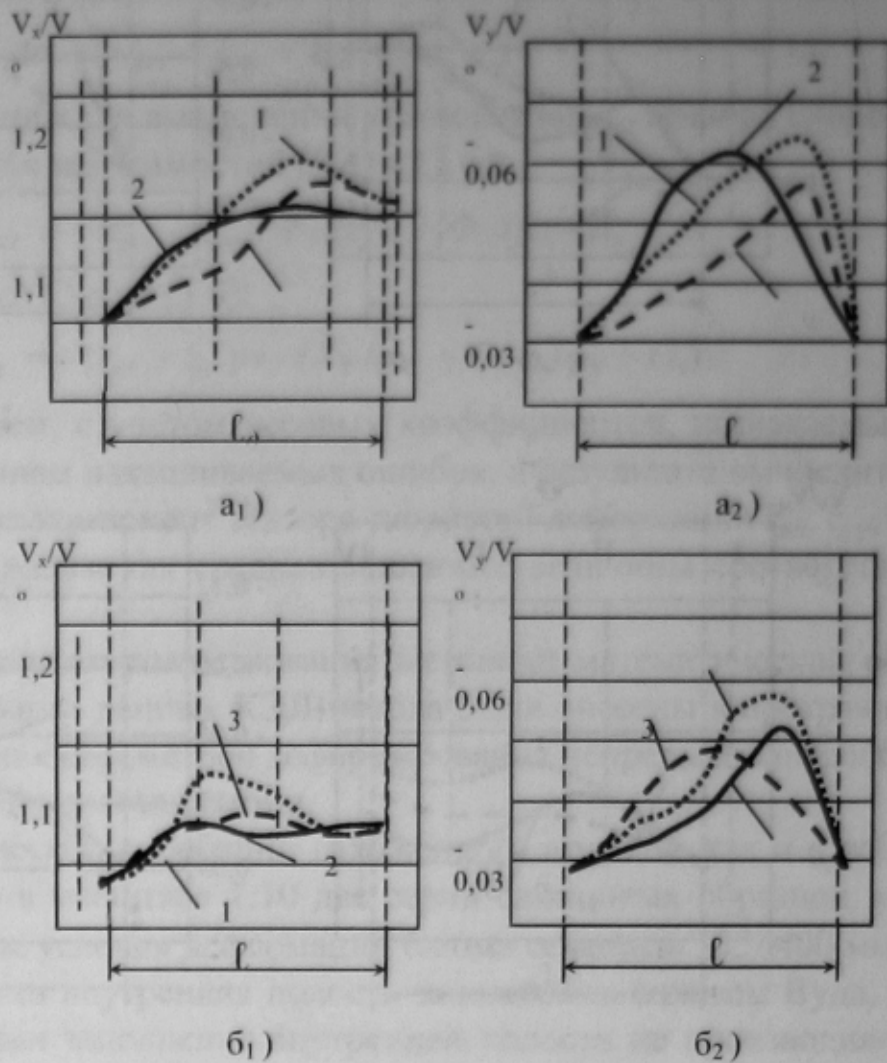


Рисунок 2 – Распределение продольных V_x/V_o и высотных V_y/V_o скоростей течения металла в вертикально-продольной плоскости симметрии физических моделей непрерывнолитого блюма с осевой зоной полый (а) и заполненной сплавом Вуда (б) при $\epsilon = 0,054-0,056$ и $A_F = 0,098$: 1 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,119$; 2 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,239$; 3 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл}) = 0,358$.

Особенно сильное влияние прослеживается в случае деформирования физических моделей с полый осевой полостью (рисунок 1а – 3а), о чем можно судить по величине компонент V_x/V_o и V_y/V_o при их сопоставлении

со случаем деформирования моделей с заполненной сплавом Вуда полостью. Наибольший интерес представляет анализ влияния управляющего фактора A_F для значения ε близкого к основному уровню варьирования $\varepsilon = 0,055$.

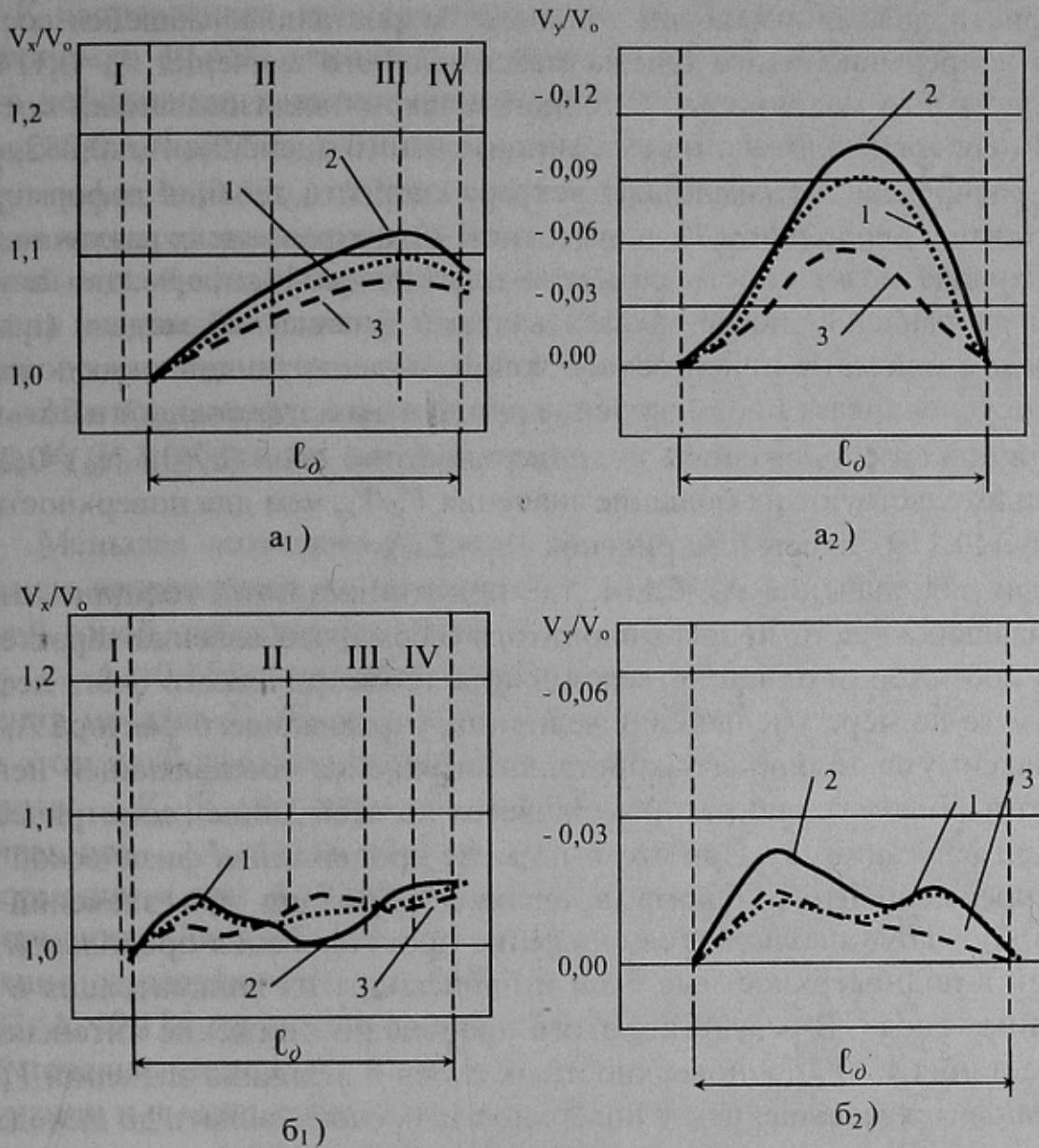


Рисунок 3 – Распределение продольных V_x/V_0 и высотных V_y/V_0 скоростей течения металла в вертикально-продольной плоскости симметрии физических моделей непрерывнолитого блюма с осевой зоной полый (а) и заполненной сплавом Вуда (б) при $\varepsilon=0,062$ и $A_F=0,082$: 1 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$, 2 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$, 3 – $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$

моделей $h_0/b_0=0,84$ и параметр очага деформации $l_d/h_{cp} \approx 0,2$ являются величинами постоянными, а их величина позволяет классифициро-

вать рассматриваемый процесс, как процесс прокатки высоких или особо высоких полос [9].

Деформирование физических моделей с полой осевой зоной.

В зависимости от изменения величины управляющего фактора A_F от характерного для минимальной толщины закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого блюма максимального значения $A_F=0,114$ до характерного для максимальной толщины закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого блюма минимального значения $A_F=0,082$, развитие и распределение компонент вектора скорости течения деформируемого металла в продольном V_x и высотном V_y направлениях различно.

Меньшая возможность развития пластической деформации в продольном направлении после захвата валками физической модели (непрерывнолитого блюма) с полой осевой зоной, моделирующей жидкую сердцевину, обуславливает проникновение продольных деформаций в большей степени в нижерасположенные подповерхностные слои ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$), о чем свидетельствуют их большие значения V_x/V_o , чем для поверхностных ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$) слоев (см. рисунок 1а₁ – 2а₁).

Если для значения $A_F=0,114$, т.е. при минимальной толщине закристаллизовавшейся части непрерывнолитого блюма, это явление характерно лишь на протяжении одной четверти длины геометрического очага деформации l_o , то по мере уменьшения величины управляющего фактора A_F до 0,082 (максимума толщины закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого блюма), оно распространяется по всей длине геометрического очага деформации l_o . При этом по мере продвижения физической модели непрерывнолитого блюма в очаге деформации для значений $A_F=0,114$ и $A_F=0,098$ наблюдается снижение проникновения продольной деформации в подповерхностные слои и происходит их концентрация в поверхностных слоях. В результате этого происходит снижение интенсивности возрастания V_x/V_o подповерхностных слоев и величина значений V_x/V_o в них становится меньше, чем у поверхностных слоев, вплоть до выхода из геометрического очага деформации. В тоже время этого не происходит для значений $A_F=0,082$ – величина V_x/V_o подповерхностных слоев остается выше V_x/V_o поверхностных слоев на всем протяжении геометрического очага деформации.

Одновременно для минимальной толщины закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого блюма и максимального значения $A_F=0,114$, после захвата валками физической модели (непрерывнолитого блюма) с полой осевой зоной, моделирующей жидкую сердцевину, промежуточные слои ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$) в начале геометрического очага деформации испытывают торможение в продольном направлении, что выражается в уменьшении в них значений продольной компоненты V_x ниже V_o ,

т.е. V_x/V_0 становится меньше единицы. Данный факт свидетельствует о "попятном" течении металла.

Явления, связанные с развитием и распределением компонент вектора скорости течения деформируемого металла в продольном V_x и высотном V_y направлениях, происходящие в процессе заполнения зева валков на величину до 40-45% (линия II на рисунок 1– 2) длины геометрического очага деформации и высоте деформируемой заготовки, т.е. по слоям поверхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$, подповерхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$ и промежуточным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$, можно трактовать как характерные для 1-й стадии процесса прокатки физических моделей (непрерывнолитого блюма) с полый осевой зоной. Верхняя граница 2-й стадии – линия III на рисунок 1 – 2 при изменении фактора A_F от 0,114 до 0,082 практически не меняет своего положения вблизи выхода из геометрического очага деформации. При этом происходит выравнивание скоростей продольного течения металла V_x/V_0 и убывание до нуля скоростей высотного течения металла V_y/V_0 .

Меньшая возможность развития пластической деформации в продольном направлении после захвата валками физической модели с полый осевой зоной, моделирующей жидкую сердцевину, в большей мере, чем при $A_F=0,114$ сказывается на перераспределении скоростей высотного течения металла V_y/V_0 при $A_F=0,098$ и $A_F=0,082$ (см. рисунок 1а₂ – 2а₂). При этом наибольшую степень локализации скоростей высотного течения металла V_y/V_0 испытывают подповерхностные слои, за исключением случаев при $A_F=0,114$ на большей части длины геометрического очага деформации и при $A_F=0,098$ вблизи средней части геометрического очага деформации. Данный факт дополнительно подтверждает существенное влияние управляющего фактора $A_F=F_0/F$ в исследованном диапазоне $0,082 < A_F < 0,114$ на характер развития и распределения компонент скоростей течения металла V_x/V_0 и V_y/V_0 по длине геометрического очага деформации и высоте деформируемых физических моделей, т.е. по их слоям: поверхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$, подповерхностным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$ и промежуточным $h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$. Максимальное расхождение в значениях V_x/V_0 и V_y/V_0 для различных слоев по высоте деформируемой физической модели от начала до конца геометрического очага деформации достигает 5% и 45% соответственно от их максимальных значений.

Деформирование физических моделей с заполненной сплавом Вуда осевой зоной.

В зависимости от изменения величины управляющего фактора A_F от 0,114 до 0,082 развитие и распределение компонент вектора скорости течения деформируемого металла в продольном V_x и высотном V_y направлениях различно, как и в случае деформирования физических моделей с полый осевой зоной.

При этом наблюдаются как аналогичные, так и отличающиеся явления. В частности, аналогичным является то, что максимальная разница в значениях V_x/V_o и V_y/V_o для различных слоев по высоте деформируемой физической модели непрерывнолитого блюма от начала до конца геометрического очага деформации составляет не более 5% и 45% соответственно от их максимальных значений. Аналогично также и то, что меньшая возможность развития пластической деформации в продольном направлении после захвата валками физической модели (непрерывнолитого блюма), обуславливает проникновение продольных деформаций в большей степени в нижерасположенные слои.

В части отличий следует отметить, что первое из них состоит в том, что проникновение продольных деформаций в большей степени происходит в нижерасположенные слои, распространяясь при этом не только на подповерхностные ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$), но и промежуточные ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$) слои. Отмеченное особенно проявляется по мере увеличения толщины заполненной сплавом Вуда полости, т.е. с увеличения значения управляющего фактора A_F до 0,098. Максимально сказывается для случая $A_F=0,098$ меньшая возможность развития пластической деформации и на перераспределении скорости течения деформируемого металла в высотном V_y направлении, которая достигает наибольшей величины в первой половине геометрического очага деформации в промежуточных ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,358$) слоях, опережая при этом как подповерхностные ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,239$), так и поверхностные ($h_i/(0,5 \cdot h_{бл})=0,119$) слои.

Второе отличие касается абсолютных значений компонент вектора скорости течения деформируемого металла в продольном V_x и высотном V_y направлениях, которые для одинаковых значений относительных обжатий ϵ , по меньшей мере, в 1,5 раза отличаются в меньшую сторону (рисунок 1–2). Причина этого, по-видимому, кроется в увеличении конструктивной прочности физических моделей вследствие заполнения полости сплавом Вуда.

Третье отличие затрагивает смещение максимумов компонент вектора скорости течения деформируемого металла в высотном V_y направлении во вторую половину геометрического очага деформации (ближе к его концу) в противоположность смещению к входу в геометрический очаг деформации для случая деформирования физических моделей с полой осевой зоной.

Еще одно отличие проявляется в многократном, а не плавном (как в случае деформирования физических моделей с полой осевой зоной) изменении, вплоть до знака, интенсивности (градиента изменения) продольной V_x компоненты вектора скорости течения деформируемого металла. При этом процесс идет с нарастанием по мере снижения величины управляющего фактора A_F от значений 0,114 до 0,082. Одновременно с этим наблюдается уменьшение абсолютных значений компоненты вектора скорости течения деформируемого металла в высотном V_y направлении более чем в 2 раза.

Таким образом, выполненный анализ влияния управляющих факторов A_F и θ (для двух граничных значений) на изменение компонент вектора скорости течения металла V_x/V_0 и V_y/V_0 показал, что во всем исследованном диапазоне изменения значений они оказывают весьма существенное влияние на характер развития и распределения, прежде всего компоненты V_x/V_0 , как по длине геометрического очага деформации, так и высоте деформируемых физических моделей. Наиболее сильное влияние прослеживается в случае деформирования физических моделей, имеющих минимальную величину фактора θ , т.е. полых физических моделей.

Список литературы

1. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев и др. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.
2. Минаев А.А., Смирнов Е.Н., Белевитин В.А. О моделировании пластического формоизменения раскатов с неравномерным распределением температуры по сечению на пластилиновых моделях // Известия вузов. Черная металлургия. – 1992. – №4. – С.57–60.
3. Математическая модель и расчёт параметров мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок / Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Т.Г. Химич и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2003. – №8. – С. 126-130. Смирнов Е.Н., Григорьев М.В. Физико–геометрическое моделирование упругопластического деформирования непрерывнолитых слитков в жидко–твердом состоянии / Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Темат. зб. наук. тр.– Краматорськ–Слов'янськ, 2003. – С.156–164.
4. Смирнов-Аляев Г.А., Розенберг В.М. Теория пластических деформаций металлов (механика конечного формоизменения). – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 367 с.
5. Минаев А.А., Белевитин В.А., Смирнов Е.Н. Расчет параметров пластического формоизменения сортовых заготовок // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. – №12. – С. 26-28.
6. Сталеплавильное производство Украины: прошлое, настоящее, перспективы / В.С. Харахулах, В.В.Лесовой, Г.Г. Матухно, и др. // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения проф. В.И. Явойского. – Киев, Днепропетровск, 2000. – С. 29-39.
7. Смирнов А.Н., Штепан Е.И., Смирнов Е.Н. Сортировка. Опыт производства сортовых заготовок для длинномерного проката // Металлы. – 2005. – №1. – С. 44–50.
8. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

Надійшла до редколегії 04.09.2008.

Є. М. СМІРНОВ*, В. А. БЕЛЕВІТІН **

* - ДВНЗ «Донецький національний технічний університет,

** - філіал ЮУГУ

Дослідження деформованого стану безперервнолитих блюмів при пластичній формозміні на стадії кристалізації. Наведені результати експериментального дослідження засобами фізичного моделювання впливу факторів процесу деформування безперервнолитих блюмів на етапі неповної кристалізації на виникаючий деформований стан у вертикально-подовжній площині симетрії.

безперервно литий блюм, кристалізація, сталь, процес деформації

YE. N. SMIRNOV*, V. A. BELEVITIN**

* - SHSI «Donetsk National Technical University»,

** - SUSU department

Research of the Deformed State of Continuously-Casting Blooms at Plastic Deformation on the Stage of Crystallization. The article presents the results of experimental research (with the use of physical models) of the influence of the factors of the process of continuously-casting blooms deformation at the stage of incomplete crystallization on the deformed state in the vertical-longitudinal plane of symmetry.

continuous casting bloom, crystallization, steel, plastic deformation

© **Е. Н. СМІРНОВ,
В. А. БЕЛЕВІТІН, 2009**