

- 1 – порошок титана дисперсностью 100 – 160;  
 2 – порошок титана дисперсностью 63 - 100 мкм;  
 3 – порошок титана дисперсностью мкм 40 – 63 мкм.

Рисунок 3 – Зависимость величины коэффициента контактирования от давления прессования для различных фракций титанового порошка.

**Заключение.** Проведены исследования влияния силового воздействия на структуру и свойства компактно-пористых материалов. Определена оптимальная величина порохового заряда при гидродинамическом прессовании 0,13 - 0,14 кг, обеспечивающего давление прессования 150 – 200 МПа. Проведены исследования экспериментальных образцов и определены зависимости их структурных свойств от параметров силового воздействия (давления прессования) и свойств исходных материалов. При давлении прессования 150 – 200 МПа пористость пористой составляющей составляет 37 – 43 %, средний размер пор 25 – 30 мкм, коэффициент контактирования пористой составляющей к компактной равен 0,5 – 0,55.

#### Список литературы

1. Александров, В.М. Исследование процесса получения и свойства компактно-пористых материалов [Текст] / В.М. Александров, А.Г. Косторнов, В.К. Шелег: Порошковая металлургия. -2009.- Вып.32. С. 211-215.- Библиогр.: с. 229.
2. Косторнов, А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов [Текст] / А. Г. Косторнов : Монография в 2-х томах. Киев: Наукова думка, 2002 г.

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОКАТКЕ

Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Шилько С.В.<sup>1</sup>, Петроковец Е.М.<sup>1</sup>, Куземкина Г.М.<sup>1</sup>,  
 Чой Х.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси

<sup>2</sup>Университет Кумина (Республика Корея)

#### Введение

Дефектность металлических заготовок, получаемых при литье, прокатке, ковке, штамповке и т.п., является экономически значимой проблемой. Уже на стадии кристаллизации слитка возникают значительные остаточные напряжения и начальные неоднородности структуры в виде зон ликвации, усадочных раковин и т.д. В последующих технологических операциях продолжается формирование напряженного состояния заготовки либо в направлении релаксации и выравнивания внутренних напряжений, либо их концентрации. Знак и уровень напряжений определяют эволюцию

первичных дефектов в масштабе структурных элементов (зерен, кристаллитов) металла. При действии растягивающих напряжений микроскопические несплошности развиваются в макроскопические трещины, вызывающие брак проката и резкое снижение работоспособности изделий при эксплуатации. Вместе с тем, определенные технологические режимы способствуют устранению (залечиванию) несплошностей и повышению качества металлопродукции. В этой связи реализация залечивания дефектов является предметом активных исследований.

Трудоемкость экспериментального определения режимов залечивания делает актуальным теоретическое описание термосилового воздействия на всех стадиях получения заготовки с учетом названного комплекса факторов. Дело в том, что непосредственное измерение внутренних напряжений и оценка состояния дефектов в заготовках затрудняется их движением и значительным формоизменением, весьма высокой (свыше  $700^{\circ}\text{C}$ ) температурой, наличием окалины и др. факторами. Практически невозможна регистрация параметров термонапряженного состояния (ТНС) металла в зонах образования и развития отдельных дефектов при значительном варьировании их формы, размеров и ориентации.

Задачи моделирования термосилового воздействия на структуру металла также весьма сложны, в особенности, применительно к анализу работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) вследствие неоднородного температурного поля, выраженной зависимости теплофизических характеристик материала слитка от температуры, комбинированного силового воздействия, включающего вес заготовки, ферростатическое давление, изгиб, растяжение и контактную нагрузку при прокатке. Новые возможности для теоретического описания процесса залечивания дефектов заготовок и практической реализации этого эффекта основаны на использовании многоуровневого моделирования в управляющих программах металлургического производства, например, при эксплуатации МНЛЗ.

### **1. Метод моделирования**

Определение термосилового воздействия на заготовку, обеспечивающего залечивание дефектов структуры металла, предполагает решение двух разномасштабных контактных задач для сопряжения «инструмент – заготовка» и взаимодействия границ отдельного дефекта в объеме материала. При указанном двухуровневом моделировании предварительно задаются начальные значения технологических параметров (геометрия заготовки и валков, вращающие моменты и прижимающие усилия) и основные физико-механические характеристики материала заготовки (предел текучести, модули упругости и упрочнения, коэффициент трения и др.) с учетом температуры. Затем на первом масштабном уровне определяется ТНС всей заготовки при комплексном воздействии температуры и силовых факторов. Второй уровень предполагает мезомеханическое исследование прочности, а именно, определение ТНС локальных объемов заготовки и состояние типичного дефекта с учетом реальной структуры металла и ТНС всей заготовки, полученного на предыдущем шаге расчета. Идея последовательного решения перечисленных задач во много раз уменьшает трудоемкость расчетов, что дает возможность реализовать моделирование в реальном времени. Исходя из критерия минимума числа дефектов, выполняется корректировка управляющих параметров технологического процесса, включая температуру и скорость движения заготовки, усилия и движущие моменты, создаваемые инструментом, т.е. реализуется обратная связь, типичная для адаптивных систем управления. Информация о режимах накапливается в базе данных и в дальнейшем учитывается при оценке качества металла в новых ситуациях.

### **2. Макромасштабный уровень: сопряжение «инструмент–заготовка»**

Рассматривая в качестве примера МНЛЗ, заметим, что термосиловое воздействие при прокатке характеризуется комбинацией растягивающих, изгибающих и контактных нагрузок от валков и направляющих роликов. В приповерхностных слоях нагретой

заготовки формируется область необратимой деформации, а соотношение тангенциальной и нормальной нагрузок в сосредоточенном контакте качения с проскальзыванием определяет глубину залегания разрушающих напряжений.

При проведении КЭ контакта заготовки с направляющими роликами и двумя тянущими устройствами в программной среде ANSYS учитывали макронеоднородность структуры, состоящей из твердой оболочки и жидкого ядра (рис. 1). Эти фазы моделировались материалами с существенно различающимися значениями модуля упругости и плотности (для твердой оболочки  $E = 15$  ГПа,  $\rho = 7400$  кг/м<sup>3</sup>, для жидкого ядра  $E = 0,1$  ГПа) и  $\rho = 6900$  кг/м<sup>3</sup> соответственно) при коэффициенте контактного трения  $f = 0,2$ . Учитывались сила тяжести, давление жидкости в разливочном котле (1,4 МПа), момент пары сил 10 кН, приложенных к тянущим валкам 2,3 и сжимающие усилия 300 кН, приложенных к роликам и валкам, проходящие через центры тяжести последних перпендикулярно поверхности контакта.

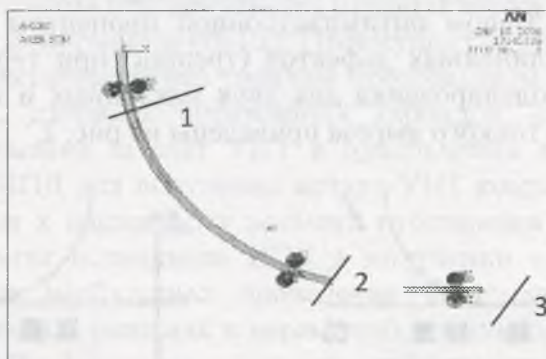


Рисунок 1 – Схема прокатки заготовки на МНЛЗ: 1 – направляющие валки; 2,3 – тянущие валки.

Для учета нелинейной зависимости напряжений и деформаций применяли метод последовательных приближений. Это позволило получить распределения эквивалентных напряжений по критерию Мизеса в объеме заготовки при действии первого (ниспадающий участок МНЛЗ) и второго (горизонтальный участок МНЛЗ) тянущих устройств, а также давлений во всех контактных парах, свидетельствующие о неоднородности напряженного состояния указанных сопряжений.

Разработанная модель может быть использована для анализа напряженно-деформированного состояния стальных заготовок, находящихся под действием реальных технологических нагрузок. В частности, представляет интерес анализ НДС заготовки при варьировании крутящего момента, т.к. последний является управляющим параметром при оптимизации качества заготовок и производительности прокатки. Установлено, что в упругой постановке задачи с ростом крутящего момента пропорционально увеличиваются внутренние напряжения, проявляется асимметрия касательных напряжений. В то время как давления практически не зависят от крутящего момента, происходит значительный рост нормальных перемещений (осадки), касательных напряжений и проскальзывания при значении момента, близкого к предельному, предшествующему началу скольжения (буксования). При упругом решении пропорциональность сил трения давлениям и начало скольжения валков соответствует моменту  $M_{\text{пред}} = 8,48$  кНм, превышение которого вызывает резкое возрастание интенсивности изнашивания инструмента. Значительная концентрация контактных напряжений обусловлена идеализацией деформационного поведения металла. При прокатке сильно разогретой заготовки имеет место текучесть, что учитывалось далее в упругопластической постановке задачи.

При решении задачи в упругопластической постановке (предел текучести  $\sigma_t = 60$  МПа) предельный момент уменьшается до 5,4 кНм). Анализируя результаты, полученные при решении упругопластической задачи, можно также сделать вывод о снижении

концентрации контактных напряжений и выравнивании эквивалентных напряжений по объему заготовки в сравнении с упругим решением. Кроме того, с ростом крутящего момента менее выражена асимметрия касательных напряжений  $\tau_{xy}(x,y)$ . С ростом крутящего момента почти не меняется величина контактного давления  $p(x)$ , а рост проскальзывания  $u(x)$  близок к линейному. В упругой постановке расчетные эквивалентные напряжения примерно в 1,5 раза превышают напряжения, вычисленные с учетом пластического течения материала. Следовательно, учет пластических деформаций позволяет уточнить НДС непрерывно литой стальной заготовки. Далее принималась во внимание зависимость физико-механических свойств (плотности, модуля упругости, теплового расширения, теплопроводности, удельной теплоемкости) стали от температуры. Сопоставление результатов моделирования без учета и с учетом зависимости свойств материала от температуры свидетельствует о необходимости принятия во внимание данного фактора.

### 3. Микромасштабный уровень: состояние дефектов

Заключительным этапом оптимизационной процедуры является прогнозирование кинетики залечивания линейных дефектов (трещин) при термосиловом воздействии. К примеру, результаты моделирования для двух наклонных и горизонтального линейного дефекта в виде прямого тонкого выреза приведены на рис. 2.

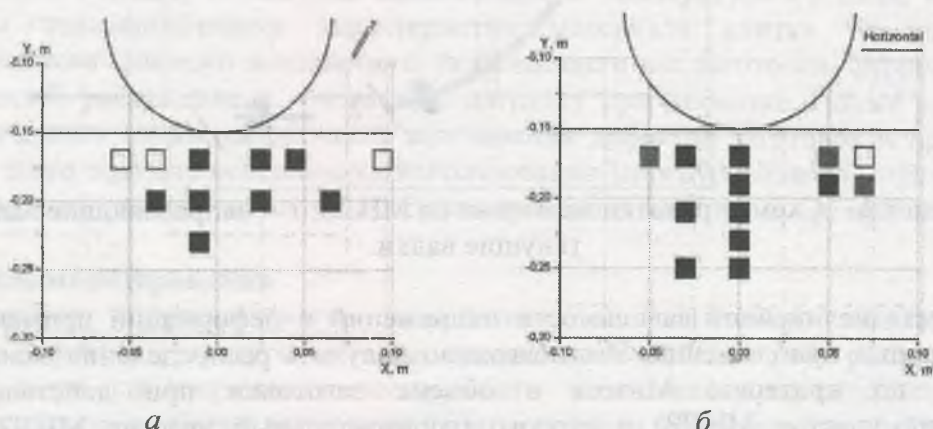


Рисунок 2 – Зависимость состояния дефекта: а – наклонного (угол наклона  $45^\circ$ ) и б – параллельного оси ОХ от его локализации.

Затемнение маркера отображает степень закрытия дефекта при перемещении контактной нагрузки от инструмента. Видно, что ориентация и локализация дефекта являются определяющими факторами с точки зрения эффективности его «залечивания» при термосиловом воздействии. Как отмечено выше, расчет такого рода является достаточно трудоемким даже в двумерной постановке, что связано с решением разномасштабных задач о контакте инструмента с заготовкой и взаимодействия краев трещины, однако позволяет создавать базу данных и компьютерное обеспечение термосилового управления прокаткой для повышения качества продукции.

### Заключение

Предложенный теоретический подход позволяет оценить параметры контактного взаимодействия с инструментом и напряженное состояние нагретой призматической заготовки на макромеханическом (в объеме заготовки) и мезомеханическом (в зоне дефекта) масштабных уровнях. Разработанная модель может быть использована для термосилового управления залечиванием структурных дефектов в виде трещин при формировании проката на машинах непрерывного литья заготовок.