



*The efficiency of the calculation-experimental investigation of slug, including construction of finite-element model of representative volume of material and receiving of polarization-optical picture of stresses, is shown.*

С. В. ШИЛЬКО, Л. П. КУХОРЕВ, ИММС НАН Беларуси

УДК 539.3

## ФИЗИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ (ТЕПЛОВОМ И СИЛОВОМ) НАГРУЖЕНИИ

Комбинированное (тепловое и силовое) нагружение характерно для многих металлургических процессов, например, технологии непрерывной разливки стали, когда, помимо термических напряжений, в слитке возникают напряжения, обусловленные изгибом, контактными деформированием направляющими роликами, ферростатическим давлением и другими факторами [1]. Так как указанные напряжения, уровень которых растет при интенсификации металлургического процесса, во многом обуславливают начало и развитие разрушения, их определение методами механики деформируемого твердого тела является средством оптимизации технологических режимов с точки зрения снижения дефектности заготовок и повышения производительности оборудования.

Детальный анализ напряженно-деформационного состояния стальных заготовок затруднен рядом факторов макро- и мезоскопического масштабного уровня.

Так, при макромеханическом исследовании необходимо учитывать двухфазное состояние металла при затвердевании, зависимость термомеханических параметров от температуры, неопределенность размеров контакта заготовки с роликами, неравномерность контактных напряжений и т.д.

Предметом мезомеханического анализа является определение напряженно-деформированного состояния материала в масштабе структурных составляющих (зерен, пор, включений, примесей) [2,3], что характерно для механики композитов [4]. Это способствует выяснению механизмов формирования дефектных зон и механических свойств в локальных объемах металла, однако применение существующих экспериментальных методов (например, рентгеноструктурного анали-

за, томографии) весьма трудоемко. В связи с этим авторами предлагается определять напряженно-деформированное состояние фрагмента заготовки методом конечных элементов, позволяющим решать связанные задачи термоупругости и термопластичности для тел произвольной формы и структуры.

Хотя экспериментальные работы по использованию поляризационно-оптического метода и фотоупругих моделей [5,6] для анализа напряженного состояния стальных слитков немногочисленны, очевидно, что при изучении полей эквивалентных напряжений в неоднородных материалах метод фотоупругости хорошо дополняет расчетные методы. Получаемые этим методом картины интерференционных полос (изохром), соответствующие линиям уровня максимальных касательных напряжений (полуразности главных напряжений), могут быть непосредственно сопоставлены с распределениями интенсивности напряжений либо эквивалентных напряжений по Мизесу, найденными в ходе мезомеханического исследования, схема которого приведена на рис. 1.

В настоящей работе выполнялся анализ напряженного состояния мезофрагмента материала слитка с модельными инородными включениями с привлечением МКЭ [7] и поляризационно-оптического метода. В частности, задавалось нагружение мезоэлемента материала, имеющего четыре включения цилиндрической формы, жестким цилиндрическим роликом. Рассматривались мезофрагменты с различными ячейками периодичности в предположении упругопластической модели деформирования. Учитывалось изменение модуля упругости материала от температуры, исходя из расчетного распределения температуры в сечении

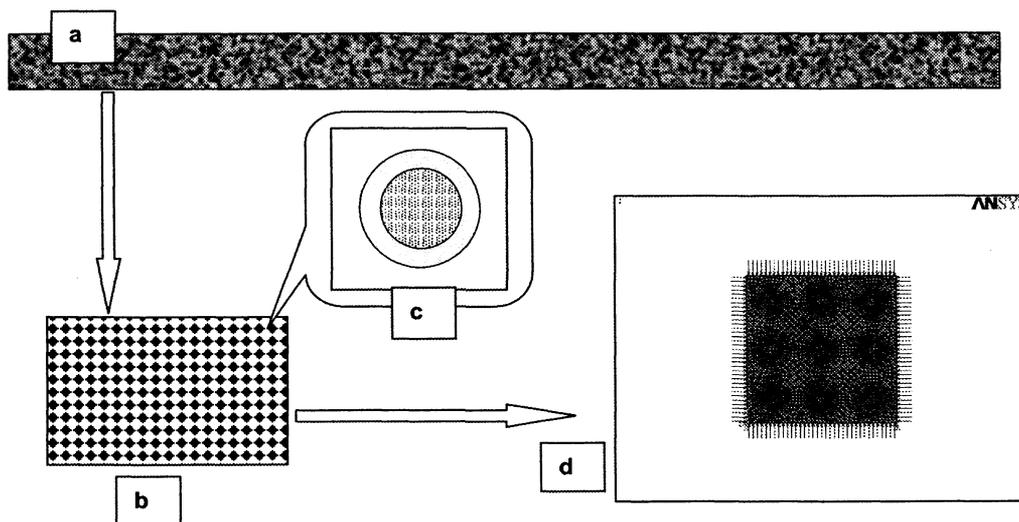


Рис. 1. Схема мезомеханического исследования материала слитка

призматической заготовки, найденного методом конечных элементов. Были получены расчетные распределения параметров НДС, в том числе эквивалентных (по Мизесу) напряжений и пластических деформаций (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает существенную концентрацию напряжений и подповерхностную локализацию течения в зоне дефектов.

Имитацию контактного нагружения мезофрагментов поверхностного слоя направляющими роликами стана непрерывной разливки стали осуществляли с использованием автоматизированного испытательного стенда Instron 5567 [8]. Нагреватель и средство дистанционного измерения температуры (пирометр) позволяли устанавливать требуемую температуру модели перед нагружением.

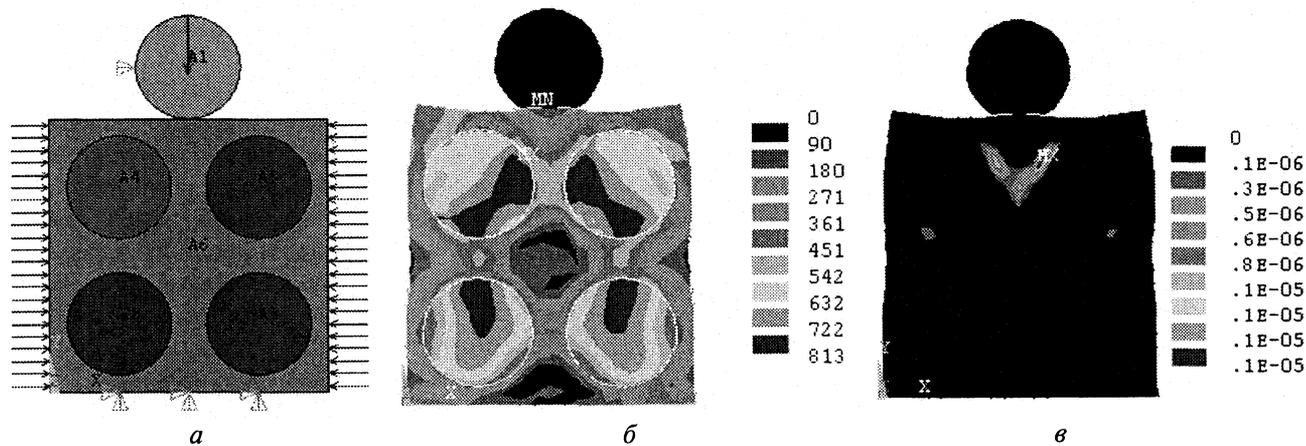


Рис. 2. Результаты мезомеханического анализа НДС мезофрагмента слитка при контактном нагружении в упругопластической стадии: а – расчетная схема мезоэлемента; б – эквивалентные напряжения  $\sigma_{экв}$ ; в – пластические деформации  $\epsilon_{пл}$

Интерференционную картину изохром на фотоупругой модели из фотоупругого полимерного материала (поликарбоната) наблюдали при помощи скрещенных поляризаторов.

Нагружающее устройство 1 с испытуемой моделью 2 устанавливается между поляризатором 3 и анализатором 4. Свет от источника 5 после поляризации испытывает двойное лучепреломление, проходя через фотоупругий материал матрицы модели. Анализатор 4 позволяет выявить интерференционную картину полос, характеризующую распределение максимальных касательных напряжений, для последующей фоторегистрации при помощи объектива (см. рис. 3).

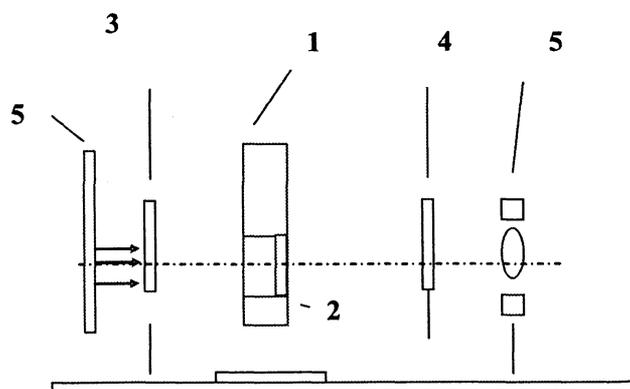


Рис. 3. Схема поляризационно-оптического исследования фотоупругих и фотопластических моделей фрагментов слитков

Полученная картина изохром (рис. 4) совпадает с результатами расчета эквивалентных напряжений, определяющих начало разрушения материала.

Таким образом, показана эффективность расчетно-экспериментального исследования заготовки, включающего построение конечно-элементной модели представительного объема материала и получение поляризионно-оптической картины напряжений.

### Литература

1. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А., Трусова И.А. и др. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Беларуская навука, 2000.
2. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2-х т. / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995.
3. Шилько С.В., Остриков О.М., Семенова Т.В., Плескачевский Ю.М. Мезомеханическое исследование металлополимерных покрытий // Вопросы материаловедения. 2002. Т. 29. Вып. 1. С. 372–377.
4. Композиционные материалы. В 8-ми т. Т. 2. Механика композиционных материалов / Под ред. Дж. Сендецки. М.: Машиностроение, 1978.

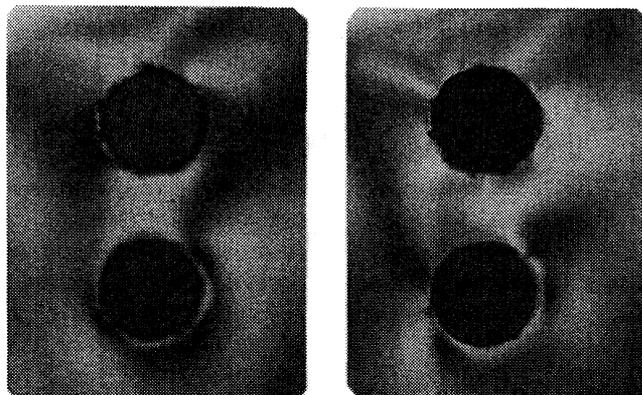


Рис. 4. Интенсивность напряжений в фотоупругой модели мезоэлемента при отсутствии (а) и наличии (б) армирующего включения

5. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризионно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.
6. Славин О.К., Трумбаев В.Ф., Тарабасов Н.Д. Методы фотомеханики в машиностроении. М.: Машиностроение, 1983.
7. ANSYS. Release 10. 2005.
8. Instron 5567 (UK, 2002). Operating Guide.