

раненко, А. В. Демченко, А. В. Маковецкий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных технологичности крупногабаритных листовых деталей: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского. – 2009. – Вып. 1 (57). – С. 79-83.

4. Авиадвигателестроение. Качество, сертификация и лицензирование: учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный, А. Ю. Замятин, В. Ю. Замятин и др.; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2003. – 840 с.

5. Качество и сертификация промышленной продукции: учебн. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. М. Рябченко и др. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 1998. – 396 с.

6. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиацион. ин-т». 2011. – 273 с.

7. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.

8. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

9. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебн. для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с.

Поступила 23.05.2015



УДК 621.735.32+621.73.042

Наука

**Белевитин В. А. /д. т. н./**  
ОАО «Уфалейский завод металлоизделий»  
**Смирнов Е. Н. /д. т. н./**  
Донецкий национальный технический университет

**Коваленко С. Ю., Суворов А. В.**  
Челябинский государственный педагогический университет

## Моделирование влияния макростроения кузнечных слитков на потенциальные возможности получения высококачественных поковок

*Представлены результаты моделирования методом конечных элементов потенциальных возможностей расширения диапазона технологических процессов производства поковок за счет интенсификации сдвиговых деформаций в объеме подвергаемых свободной ковке на прессах кузнечных слитков с трехлепестковой конфигурацией его поперечного сечения. Показано влияние использования при моделировании гипотез изотропности и структурной неоднородности на интенсивность преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую при использовании плоских и комбинированных бойков. Ил. 6. Библиогр.: 8 назв.*

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, сдвиговые деформации, производство поковок, макростроение кузнечного слитка, гипотезы моделирования

*The results of range expanding potential possibilities of technological process of forgings manufacturing by using shear deformations intensification in the volume of forging ingots with a trilobal cross-section configuration which are subjected by free forging and performed by FEM modeling are presented. The influence of hypothesis of isotropy and structural heterogeneity used during modeling influence on the transformation intensity of dendritic structure from coarse into fine-grained structure by using flat and combined striver has shown.*

**Keywords:** shear deformations, FEM modeling, forgings manufacturing, forging ingots macrostructure, hypothesis of modeling

### Постановка проблемы

Увеличение выхода годного металла и, как следствие, повышение экономичности способов производства готовой продукции – одна из наиболее важных составляющих частей проблемы ресурсосбережения, металлоемкости наци-

онального продукта. При этом к качеству готовой продукции предъявляются все более высокие требования.

Применительно к процессу получения высококачественных поковок с заданной макроструктурой и требуемым уровнем распределе-

ния физико-механических свойств металла, в том числе в части результатов идентификации размеров допускаемых несплошностей при их неразрушающем ультразвуковом контроле по соответствующей методике ASTM или DIN, данная проблема решается как путем совершенствования формы исходного слитка, так и применения различных технологических приемов в основе которых лежат такие ресурсы физико-механического воздействия: термозональный фактор или деформационный эффект бойков с рабочими поверхностями, обеспечивающими интенсификацию сдвиговых деформаций [1-3 и др.].

С позиции повышения проработки осевой зоны слитка, а именно – преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую, одна из ведущих ролей в механизме собственно пластической деформации и закрытия несплошностей (смыкания, закрытия, заварке полостей) деформируемого металла [4, 5], отводится именно сдвиговым деформациям. При этом потенциальный деформационный эффект от интенсификации сдвиговых деформаций, величина которых значительно меньше по сравнению с нормальными компонентами тензора деформаций, в разы больше деформационного влияния последних [6].

Однако реализация вышеназванных подходов требует с одной стороны, детального изучения на математических моделях возможности промышленной реализации технологического передела макростроения кузнечных слитков и интенсификации сдвиговых деформаций, а с другой – проведения, по меньшей мере, лабораторно-промышленных испытаний, подтверждающих (опровергающих) результаты, полученные на математических моделях.

Применительно к условиям производства поковок из трехлучевого слитка, в условиях ОАО «Уфалейский завод металлоизделий» по серным отпечаткам выявили изменения в расположении «зон усов» и ликвационных зон (рис. 1). В то же время, вопрос влияния подобной макроструктуры слитка на потенциальные возможности получения высококачественных поковок путем преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую за счет интенсификации сдвиговых деформаций, остается слабо исследованным и носит актуальный характер.

#### Анализ последних исследований и публикаций

Описывая сложный комплекс явлений, характерных для пластической деформации металлов и сплавов, исследователи, в стремлении создать детальную картину изучаемых процессов, приходят к необходимости строить все бо-

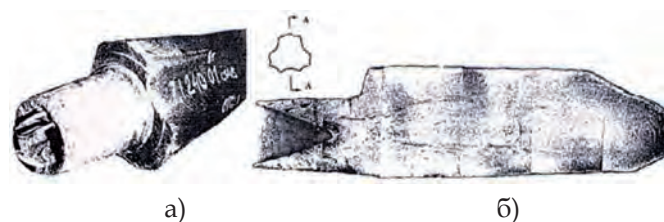


Рис. 1. Трехлучевой слиток массой 8 т (а) и его серный отпечаток в сечении А-А (б)

лее сложные математические модели, которые требуют применения тонкого и эффективно современного математического аппарата не только для определения деформационных и температурных параметров, но и для описания структурных изменений и свойств деформируемого металла.

Основой для создания теоретических методов расчета процессов пластического формоизменения, а также критерием правильности и точности аналитических решений являются опытные данные. По сути, достоверность получаемых методом конечных элементов результатов обусловлена наличием опытно-экспериментальных данных об особенностях пластического течения металла.

Потенциальные возможности преодоления множества затруднений, сдерживавших решение не только пространственных (объемных) задач, но и их частных случаев – двумерных в плоскостях симметрии и на боковой грани от статуса экспериментально-расчетного уровня до экспериментально-аналитического заложены Г. А. Смирновым-Аляевым и В. М. Розенбергом [7] за счет реализации подхода по использованию обработки экспериментальной информации не только в Эйлеровом или Лагранжевом, а и в комбинированном Эйлерово-Лагранжевом представлении (КЭЛ-представлении). В этом случае КЭЛ-представление обрабатываемой экспериментальной информации значительно расширяет возможности теоретических методов моделирования пластического формоизменения металлов и в частности метода конечных элементов.

Первичной отправной позицией для МКЭ-моделирования процесса свободнойковки стали полученные на слоистых образцах из Pb-Sb-сплава в модельных условиях с использованием КЭЛ-метода [8] при их поэтапном деформировании экспериментально-расчетные компоненты  $\xi_{ij}$  тензора скоростей деформаций  $T_{\dot{\epsilon}}$ , отражающие мгновенную («замороженную») картину деформированного состояния в фиксированный момент времени  $t$ .

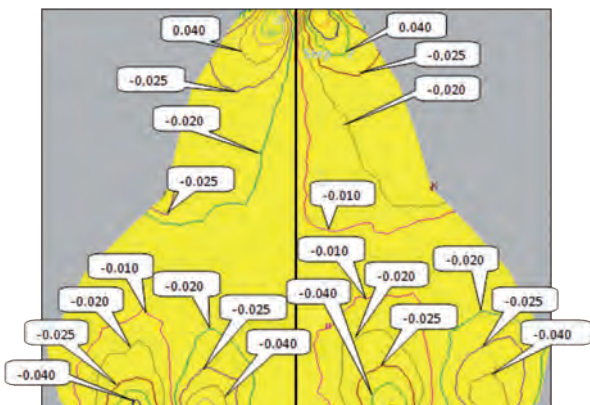
Выполненные в дальнейшем исследования показали, что расположение и вид (конфигурация) зон максимальных скоростей деформации

(мгновенных деформаций)  $\xi_{22}$  и  $\xi_{33}$  достаточно хорошо согласуются с эпюрами изменения изохром, полученных на образцах из эпоксидной смолы и свинцовых образцах с оптически-чувствительным покрытием при их упругой и пластической деформации, если поля изохром интерпретировать как поля скоростей деформаций, а также с эпюрами распределения высотных и поперечных деформаций, полученных по результатам измерений нанесенной в плоскостях симметрии свинцовых образцов координатной сетки. Различия наблюдаются для периферийных слоев деформируемой заготовки, что объясняется краевым эффектом поляризации оптического метода. Вместе с тем, полученные результаты с высокой степенью сходимости коррелируют с данными, полученными А. А. Милениным при МКЭ-моделировании процесса протяжки в вырезных бойках.

В связи с вышеизложенным, видится целесообразным практическое использование коммерческого программного продукта Deform 3D – самого распространенного специализированного комплекса для моделирования условий пластического формоизменения металла в процессе деформации. При этом с позиции выявления наилучших условий проработки литой структуры подвергнутого пластическому формоизменению кузнечного трехлучевого слитка наибольший интерес представляет распределение сдвиговых деформаций  $\xi_{ij}$  (касательных компонент  $T_{\xi}$ ), в поперечном его сечении.

**Цель работы**

Разработка на основе метода конечных элементов методики моделирования и оценки влияния макростроения кузнечных слитков с трехлучевым поперечным сечением на потенциальные возможности получения высококачественных поковок за счет интенсификации сдвиговых деформаций.



**Рис. 2.** Изолинии сдвиговых деформаций  $\xi_{23}$  в поперечном сечении моделей, подвергнутых обжатию  $\epsilon = 3,7\%$ : с учетом химической неоднородности (слева) и без нее (справа)

**Изложение результатов исследования**

Ниже представлены первичные результаты 3D-МКЭ-моделировании пластического формоизменения кузнечных слитков с трехлучевым поперечным сечением, выполненные в программном комплексе Deform 3D для следующих условий:

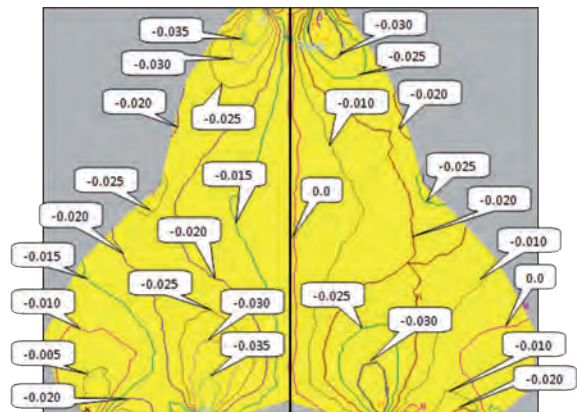
- тип бойков: плоские и комбинированные (верхний плоский, а нижний – с углом выреза  $135^\circ$ );
- макроструктура слитка: изотропная и с наличием ликвации;
- степень относительного обжатия  $\epsilon$ : 3,7 % и 11 %.

Результаты первичных расчетов приведены на рис. 2 и 3. При этом на рис. 2 (левая половина) представлена картина изолиний сдвиговых деформаций  $\xi_{23}$  в поперечном сечении подвергнутого обжатию в плоских бойках на величину  $\epsilon = 11\%$  трехлучевого слитка с учетом его ликваций и при условии его изотропности (в правой половине), а на рис. 3 – картины изолиний касательных компонент  $T_{\xi}$  в поперечном сечении для аналогичных условий.

Сопоставление значений изолиний с учетом ликваций и условия изотропности свидетельствует об имеющих место различиях у подвергнутого пластическому формоизменению кузнечного трехлучевого слитка при сохранении их общей картины распределения.

Максимальные по абсолютной величине значения касательных деформаций (мгновенных) в поперечном сечении трехлучевого слитка принимают в зонах контакта с деформирующим инструментом – бойками. В то же время наибольшие высотные и поперечные деформации характерны для центральных слоев деформируемой заготовки.

Учитывая, что разница, а, следовательно, и квадрат разницы между нормальными компо-



**Рис. 3.** Изолинии касательных компонент  $T_{\xi}$  в поперечном сечении моделей, подвергнутых обжатию  $\epsilon = 11\%$ : с учетом химической неоднородности (слева) и без нее (справа)

нентами тензора скоростей деформаций  $T_{\xi}$  максимальны в осевой зоне, где наименее развиты касательные деформации, здесь следует ожидать относительно невысоких значений второго инварианта тензора  $T_{\xi}$ , а именно интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$ , накопленной степени деформаций сдвига  $\Lambda$ , отображающих суммарное воздействие на проработку литой структуры подвергаемого пластическому формоизменению кузнечного слитка.

Данный вывод подтверждается полученным в дальнейшем распределением значений изолиний интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$  в поперечном сечении с учетом его химической неоднородности. Учет химической неоднородности осуществлялся посредством варьирования размерами элементов конечно-элементной сетки пропорционально соответствующему значению сопротивления деформации материала деформируемой заготовки.

Сопоставительный анализ полей интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$  в поперечном сечении с использованием учета его химической неоднородности (рис. 4, слева) и без (при условии его изотропности, рис. 4, справа) выявляет некоторые наглядные их различия в значениях величины  $N$ , большей на 17,5 %, для случая деформирования слитка с учетом наличия в его объеме ликвации.

В то же время, различия касаются также проникновения на большую глубину в осевую зону деформируемой заготовки со стороны воздействия деформирующего инструмента – верхнего плоского бойка с одновременным расширением занимаемой площади влияния значений величины  $N$ , для которой заданы значения ликвации. С позиции повышения проработки осевой зоны данное обстоятельство играет положи-

тельную роль, особенно в случае применения рационального технологического режима кантовок деформируемой заготовки.

Сопоставительный анализ полей изолиний интенсивности сдвиговых деформаций  $N$  в поперечном сечении при условии изотропности его физико-механических свойств с использованием обжатия ( $\epsilon = 11\%$ ) плоскими бойками (рис. 5, слева) и комбинированными бойками – верхний боек плоский и нижний – вырезной (рис. 5, справа) выявляет некоторые наглядные их различия в значениях величины  $N$  преимущественно в зоне действия нижнего вырезного бойка с углом выреза  $135^\circ$  (рис. 5, справа, внизу) в сторону их увеличения, по меньшей мере, в 2 раза, тогда как в зоне действия верхнего плоского бойка имеет место практически аналогичная картина полей изолиний с идентичными значениями величины  $N$ .

Сопоставительный анализ полей интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$  в поперечном сечении трехлучевого слитка при использовании комбинированных бойков (верхний боек плоский, а нижний – вырезной) с учетом химической неоднородности и, как следствие, анизотропии сопротивления деформации в его поперечном сечении (рис. 6, слева) и без нее (при условии его изотропности, рис. 6, справа) выявляет некоторые наглядные их различия в значениях величины  $N$ , касающиеся преимущественно осевой зоны и в значительно меньшей степени областей, примыкающим к зонам контакта с бойками. С позиции повышения проработки осевой зоны, а именно, преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую, данное обстоятельство играет положительную роль вследствие значительной роли сдвиговых деформаций в механиз-

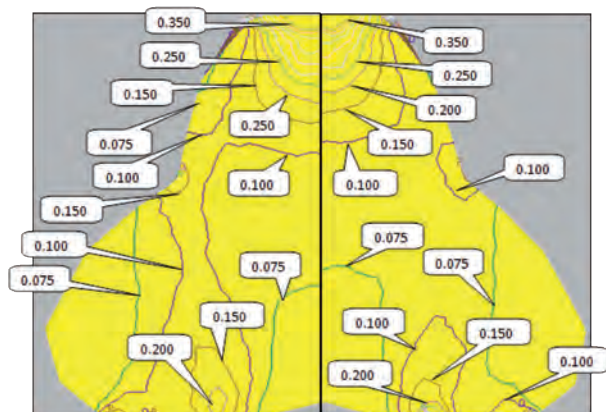


Рис. 4. Изолинии интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$  в поперечном сечении моделей, подвергнутых обжатию  $\epsilon = 11\%$ : с учетом химической неоднородности (слева) и без нее (справа)

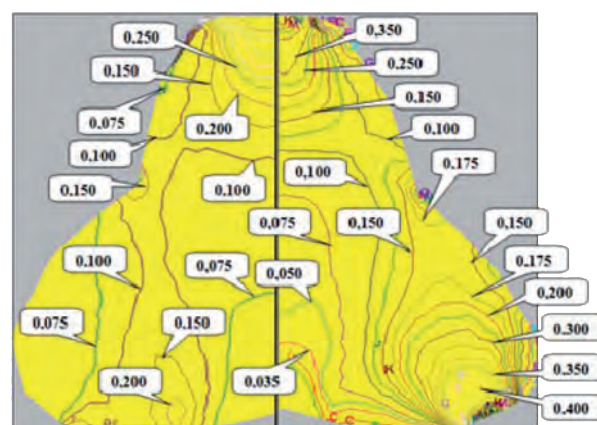


Рис. 5. Изолинии интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $N$  в поперечном сечении моделей при условии изотропности его физико-механических свойств,  $\epsilon = 11,0\%$ : обжатие в плоских (слева) и в комбинированных бойках (справа)

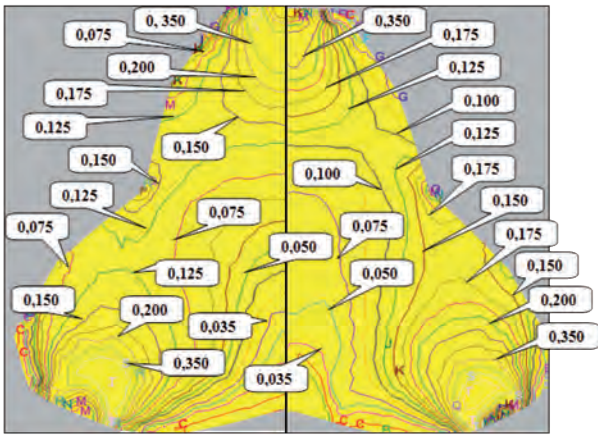


Рис. 6. Изолинии интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $H$  в поперечном сечении моделей, подвергнутых обжатию  $\epsilon = 11,0\%$  в комбинированных бойках: с учетом химической неоднородности (слева) и без нее (справа)

ме собственно пластической деформации и закрытия несплошностей (смыкания, заварке несплошностей) деформируемого металла [4, 5].

Представленные на рис. 5 и рис. 6 результаты позволяют расширить диапазон технологических процессовковки труднодеформируемых и малопластичных сталей и обеспечивать минимальную анизотропию механических свойств при небольшом коэффициенте укова в случае применения, в частности, рациональных режимов кантовок деформируемых заготовок. При этом успех в решении задач эффективного ресурсосбережения (энерго- и материалоемкости поковок) во многом определяется потенциалом и условиями практической реализации человеческого капитала специалистов металлургической и машиностроительной отраслей промышленного производства, ученых и исследователей научно-исследовательских, технологических и конструкторско-технологических организаций.

**Выводы**

Наличие полученных на слоистых образцах из Pb-Sb-сплава в модельных условиях с использованием комбинированного Эйлера-Лагранжевого метода опытно-экспериментальных данных об особенностях пластического течения металла позволило разработать на основе метода конечных элементов методику моделирования влияния макростроения кузнечных слитков на потенциальные возможности получения высококачественных поковок путем преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую за счет интенсификации сдвиговых деформаций. Впервые для случая свободнойковки кузнечных слитков с трехлучевым поперечным сече-

нием методом 3 D-МКЭ-моделирования получены поля изолиний «мгновенных» деформаций сдвига  $\xi_{ij}$  тензора скоростей деформаций  $T_{\xi}$  («мгновенных» касательных деформаций) и интенсивности мгновенных деформаций сдвига  $H$  для случаев применения плоских и комбинированных бойков как с учетом изотропности, так и при наличии химической неоднородности макростроения кузнечных слитков. Предсказана возможность расширения диапазона технологических процессовковки труднодеформируемых и малопластичных сталей с обеспечением минимальной анизотропии механических свойств при небольшом коэффициенте укова в случае применения, в частности, рациональных режимов кантовок деформируемых заготовок.

**Библиографический список**

1. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки валов с применением макросдвигов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 11. – С. 15-20.
2. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 1. – С. 36-42.
3. Белевитин В. А. Основания необходимости учета несовершенств кузнечного слитка при проектировании процессаковки на прессах // В сб. научн. трудов Донбасской гос. машиностр. академии «Обработка металлов давлением». – Краматорск: ДГМА. – 2012. – № 4 (33). – С. 81-85.
4. FEM finalis for the prediction of void closure on the free forging process of a large rotor / K. J. Lee, W. B. Bae, J. R. Cho, D. K. Kim, Y. D. Kim // Trans. Materials Processing, 16. – 2007. – P. 126-131.
5. Роль сдвиговых деформаций в закрытии внутренних дефектов / А. Б. Найзабеков, Ж. А. Ашкеев, С. Н. Лежков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 10. – С. 20-22.
6. Тюрин В. А. Технология и процессыковки на прессах. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
7. Теория пластических деформаций металлов. Механика конечного формоизменения / Г. А. Смирнов-Аляев, В. М. Розенберг. – М.-Ленинград: Гос. науч. технич. изд-во машиностроительной литературы, 1956. – 367 с., ил.
8. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением) / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. – М.: Металлургия, 1990. – 480 с., ил.

Поступила 23.06.2015