

УДК 621.735.043.016.3-114;621.771.67  
DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-32-36

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ

© 2015 г. С.А. Машеков, Н.Т. Смайлова, А.Е. Нуртазаев, А.М. Алшынова

Казахский национальный технический университет (КазНТУ) им. К. Сатпаева, г. Алматы  
Павлодарский государственный университет (ПГУ) им. С. Торайгырова,  
Республика Казахстан

*Статья поступила в редакцию 07.03.14 г., доработана 06.05.14 г., подписана в печать 23.05.14 г.*

Методом конечных элементов и с использованием программы MSC.SuperForge получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения напряженно-деформированного состояния и температуры при моделированииковки на радиально-ковочной машине с углами кантовки 30°, 60°, 90°, 120°, 150° и 180° и величинами обжатий 10, 15 и 20 %. Показано, что степень деформации сдвига имеет максимальное значение на участках, прилегающих к поверхности заготовки, а наименьшее – в центральной ее зоне.

**Ключевые слова:** протяжка, радиально-ковочная машина (РКМ), напряженно-деформированное состояние (НДС), метод конечных элементов, совмещенный способ ковки.

The quantitative data are established and main regularities of the distribution of the deformation mode when modeling forging using a radial forging machine with canting angles of 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, and 180° and magnitudes of reductions of 10, 15, and 20 % are obtained by the finite-element method using the MSC.SuperForge program. It is shown that the degree of shear deformation is maximal at segments adjoining the billet surface and minimal in its central zone.

**Keywords:** broach, radial forging machine (RFM), deformation mode, finite element method, combined forging method

### Введение

Перспективным направлением развития современного производства металлических изделий в машиностроении является применение ресурсосберегающих технологий, повышающих производительность труда и качество продукции [1]. Поэтому в металлургии и машиностроении широко используются комбинированные и совмещенные методы обработки металлов [2]. Для интенсификации протяжки в совмещенных процессах ковки

необходима информация о напряженно-деформированных состояниях (НДС) материала заготовки, полуфабриката и поковки, а также сведения об откликах системы «боек соответствующей конфигурации — деформируемая заготовка» на изменение технологических параметров [1]. Для их получения применяются методы экспериментального исследования и теоретического моделирования, а также их комбинация.

*Машеков С.А. — докт. техн. наук, профессор кафедры станкостроения, материаловедения и технологии машиностроительного производства КазНТУ (050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22). Тел.: (727) 388-41-07. E-mail: mashekov.1957@mail.ru.*

*Смайлова Н.Т. — докт. техн. наук, профессор кафедры механики и нефтегазового дела ПГУ (140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64). Тел.: (7182) 205046. E-mail: ganibek2006@mail.ru.*

*Нуртазаев А.Е. — канд. техн. наук, ст. преподаватель той же кафедры. Тел.: (727) 257-71-68.*

*Алшынова А.М. — ст. преподаватель той же кафедры. E-mail: aiman16@mail.ru.*

Для определения границ очага деформации и расчета НДС в экспериментах используется так называемый трехмерный очаг деформации (так как в процессековки он изменяет свой размер в трех направлениях). При этом дважды применяется допущение о плоской деформации для его двух взаимно перпендикулярных сечений (поперечное и продольное) [3, 4]. Однако в действительности очаг объемный, поверхность раздела течения не является плоской. Согласно данным работ [3, 4], при ковке на радиально-ковочной машине (РКМ) деформация металла заготовки осуществляется за счет потоков вытеснения; очаг деформации в поперечном сечении не распространяется до осевой зоны. Известно, что при ковке на РКМ в осевой зоне заготовки возникают трещины, что не может быть реализовано опытным путем, поэтому рекомендации, полученные на основе анализа исследуемого процесса, носят общий характер и не могут быть использованы для его оптимизации.

Авторами [1, 3–5] показано, что при ковке бойками различной конфигурации максимальная деформация может сосредотачиваться в различных зонах заготовки. При этом в прилегающих к инструменту областях, а также в осевой зоне поковок могут возникать растягивающие напряжения (в зависимости от режимов деформирования), которые при протяжке поковок из малопластичных сплавов могут привести к нарушению сплошности металла.

Необходимо отметить, что основным недостатком многих работ, посвященных изучению процесса протяжки, является оценка неравномерности деформации по сечению протягиваемой заготовки с позиций единичного обжатия [5–11]. Известно, что уровень и стабильность свойств материала поковок зависят от величины напряжения и деформации после каждого обжатия и кантовок [12], расчет которых многими исследователями не приводится. Критерий оптимизации угла кантовки у разных авторов различен, в результате чего данные по его величине для заготовки, протягиваемой в различных по форме инструментах, достаточно противоречивы и нуждаются в уточнении.

Поэтому для создания рациональной технологии протяжки и определения оптимальной величины углов кантовки, относительной подачи и единичного обжатия в настоящей работе было исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки при протяжке совмещенной ковкой.

## Материалы и методы исследований

Для исследования НДС заготовки в ходе протяжки поковок типа валов по схеме «круг—круг» использовали широко известный метод конечных элементов, реализованный в программном продукте MSC.SuperForge [13], достоверность расчетов и эффективность применения которого для компьютерного моделирования процессовковки подтверждает опыт ведущих промышленных компаний Японии, США и ЕС, таких как «Ford», BMW, «Toyota Motor Co», «DENSO» и др.

Исследование объемного НДС заготовки при протяжке является контактной, упругопластической, нелинейной задачей с учетом температурного режима деформирования, а также больших перемещений и деформаций. Нами произведен расчет НДС горячей заготовки при многократных кантовках и обжатиях. При этом использован цилиндрический образец размером  $\varnothing 60 \times 300$  мм. Из базы данных в качестве материала заготовки была выбрана углеродистая сталь марки S20C (сталь Ст.3 по стандарту стран СНГ) с температурным диапазоном деформирования 900–1250 °С.

Для моделирования пластичности материала заготовки использовалась упругопластическая модель Джонсона—Кука. В программе MSC.SuperForge инструменты принимаются абсолютно жесткими, а материалом бойка, по умолчанию, считается инструментальная сталь с соответствующими тепловыми свойствами и плотностью.

Взаимодействие между жестким бойком и деформируемым материалом заготовки описывается с помощью контактных поверхностей, которые определяют контактные условия между ними. В ходе моделирования эти условия постоянно обновляются, отражая движение бойков и деформацию материала обрабатываемой заготовки, что позволяет описывать скольжение между ними. При конечно-элементном моделировании процессаковки использовали кулоновский модуль трения:  $\tau = \mu\sigma$  (где  $\tau$  — напряжение сдвига в контакте,  $\sigma$  — нормальное напряжение в контакте,  $\mu$  — коэффициент трения, который был принят равным 0,3).

Трехмерная геометрическая модель заготовки и бойка была построена в CAD-программе Inventor и импортирована в CAE-среду MSC.SuperForge. При создании конечно-элементной модели заготовки и бойка был использован трехмерный объемный элемент STETRA — четырехузловой тетраэдр.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1—3 представлены картины распределения НДС по сечению заготовки при ковке на РКМ с единичным обжатиями  $\epsilon = 10$  и  $15\%$  и углами кантовки  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .

На основе полученных результатов численного моделирования установлено следующее:

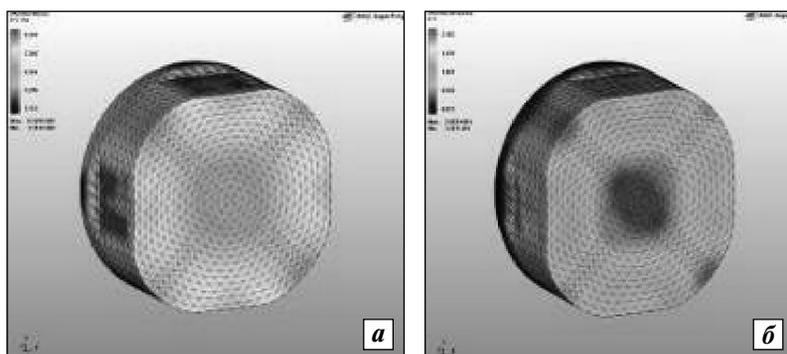
- при протяжке круглой заготовки на РКМ интенсивности напряжений и деформаций на начальном этапе первого обжатия локализуются в поверхностных зонах заготовки (см. рис. 1), а с ростом величины  $\epsilon$  их акцент смещается к средней части ее радиуса;

- деформирование с кантовкой на  $30^\circ$  и  $60^\circ$  позволяет сосредоточить интенсивность напряжения и деформации в зоне контакта металла с инструментом на начальном этапе обжатия, а с ростом последнего эту зону перенести ближе к центральной части заготовки; при этом от поверхности до середины радиуса интенсивность напряжений и деформации распределяется равномерно (см. рис. 2 и 3);

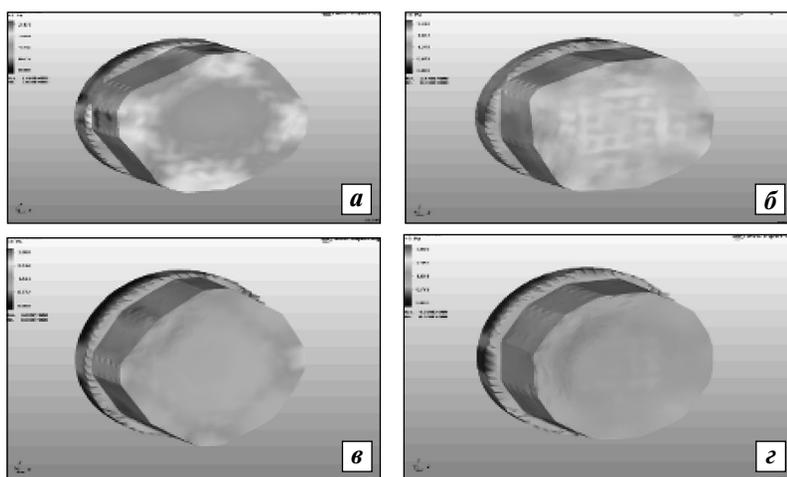
- в процессе протяжки на РКМ в зонах локализации напряжения и деформации температура повышается, а в центральной области заготовки она понижается.

Степень деформации сдвига (накопленной деформации —  $\Lambda$ ) вычислили путем суммирования интенсивностей деформации для ряда технологических режимовковки на РКМ. Анализ эпюр изменения  $\Lambda$  по сечению заготовки показывает (рис. 4), что при рациональном технологическом режимековки на РКМ (протяжка с углом кантовки  $30^\circ$ ) степень деформации сдвига имеет большое значение на участках, прилегающих к поверхности заготовки, в то время как в центральной ее зоне заготовки она минимальна.

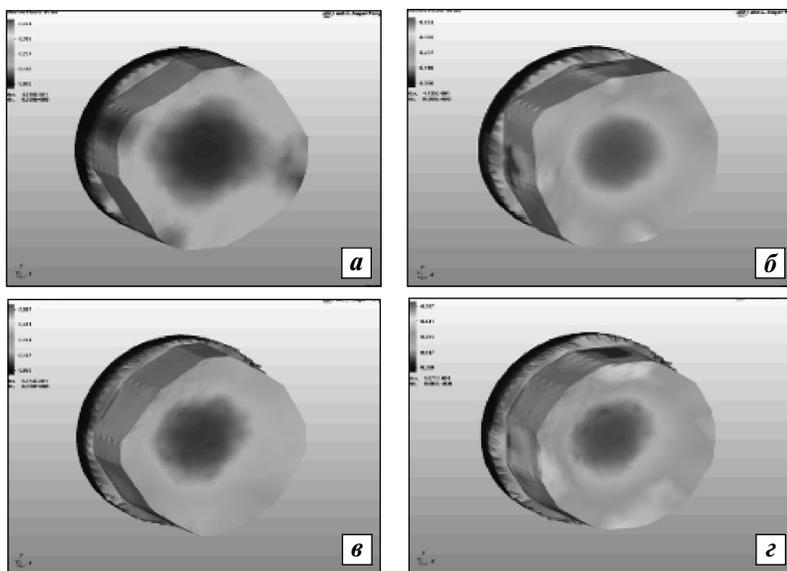
Таким образом, при ковке на РКМ интенсивности напряжения и деформации, а также степень деформации сдвига сосредотачиваются в поверхностных и средних зонах заготовки. Поэтому для получения поковки с равномерной мелкозернистой



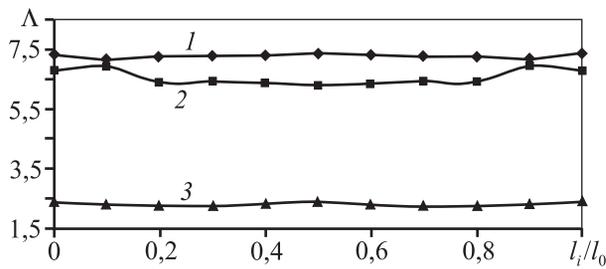
**Рис. 1.** Картина распределения интенсивности напряжений (а) и деформации (б) в заготовке при ковке на РКМ  $t = 1150^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 10\%$



**Рис. 2.** Картина распределения интенсивности напряжений при ковке на РКМ с углом кантовки  $30^\circ$  (а и б) и  $60^\circ$  (в и г)  $t = 1150^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 15\%$ ;  $n = 3$  (а, в) и 6 (б, г) ( $n$  — количество кантовок)



**Рис. 3.** Картина распределения интенсивности деформаций при ковке на РКМ с углом кантовки  $30^\circ$  (а и б) и  $60^\circ$  (в и г)  $t = 1150^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 15\%$ ;  $n = 3$  (а, в) и 6 (б, г)



**Рис. 4.** Распределение степени деформации сдвига по продольному сечению заготовки при протяжке на РКМ  
Сечение 1 –  $D_i/D_0 = 0,9$ , 2 –  $0,75$ , 3 –  $0,5$   
 $l_i$  и  $D_i$  – расстояния до исследуемой точки по длине и диаметру  
 $l_0$  и  $D_0$  – длина и диаметр очага деформации

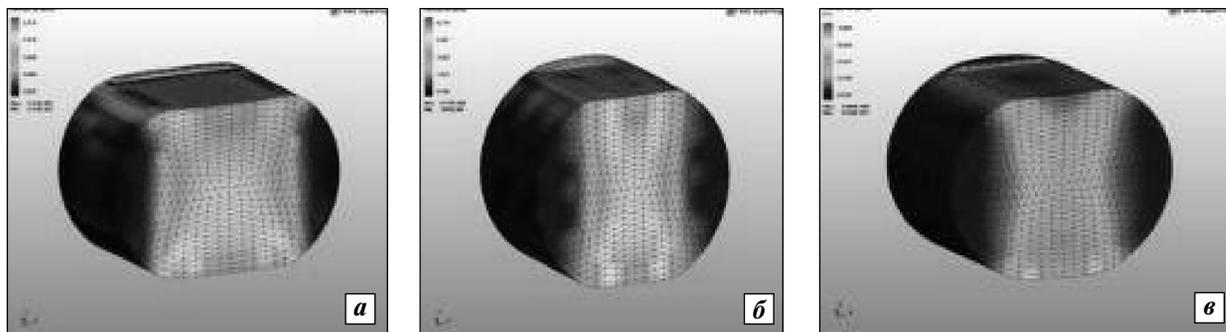
структурой необходимо использовать совмещенный способковки с применением РКМ и другого оборудования. В качестве совмещенного процесса нами выбрана протяжка в плоских бойках. На рис. 5 и 6

представлены картины распределения интенсивности деформаций по сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с единичным обжатием  $\epsilon = 20\%$ .

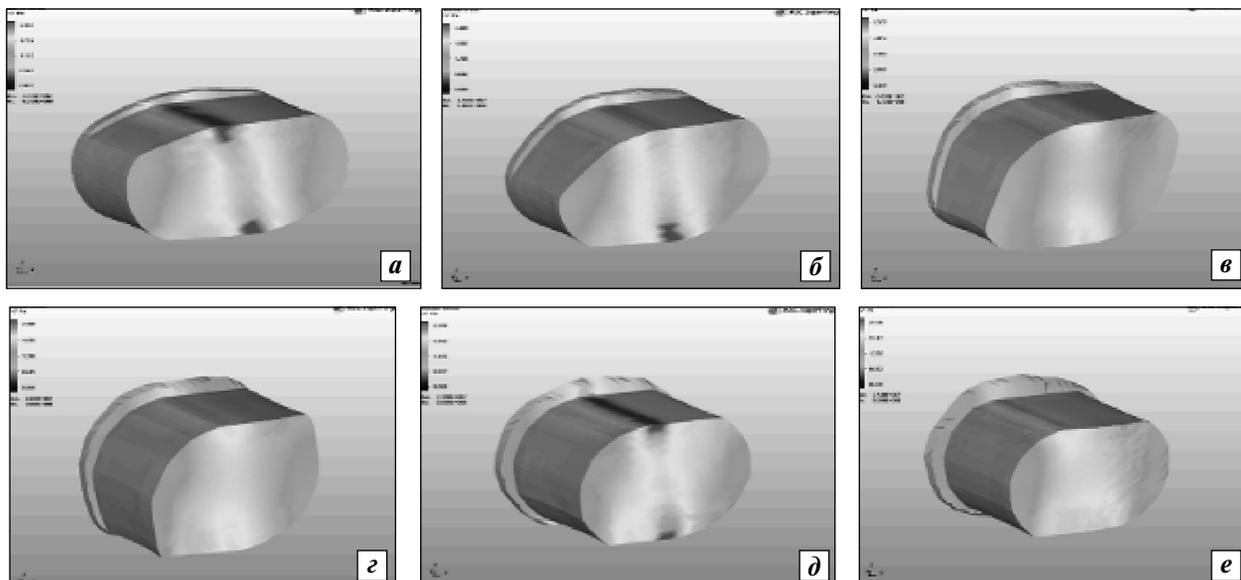
На основе полученных результатов численного моделирования установлено следующее:

– при протяжке круглой заготовки в плоских бойках с относительной подачей  $S = l/D = 1,0$  интенсивность деформации локализуется на начальном этапе первого обжатия ( $\epsilon = 10\%$ ) в поверхностных зонах заготовки, а с увеличением единичного обжатия ( $\epsilon = 20\%$ ) она распределяется по ковочному кресту (см. рис. 5), при этом акцент деформации переносится в центр заготовки;

– та же картина наблюдается при протяжке с  $S = 0,8$  и  $0,6$ ; при этом максимальная по величине интенсивность напряжения и деформации сосредотачивается в средней ( $S = 0,8$ ) или поверхностной ( $S = 0,6$ ) частях заготовки;



**Рис. 5.** Картина распределения интенсивности деформаций в заготовке при протяжке в плоских бойках  
 $t = 1250\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 20\%$ ; а –  $S = 1,0$ ; б –  $0,8$ ; в –  $0,6$



**Рис. 6.** Картина распределения интенсивности деформаций в заготовке при протяжке в плоских бойках  
Угол кантовки  $30^\circ$  (а),  $60^\circ$  (б),  $90^\circ$  (в),  $120^\circ$  (г),  $150^\circ$  (д),  $180^\circ$  (е);  $t = 1250\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon = 20\%$

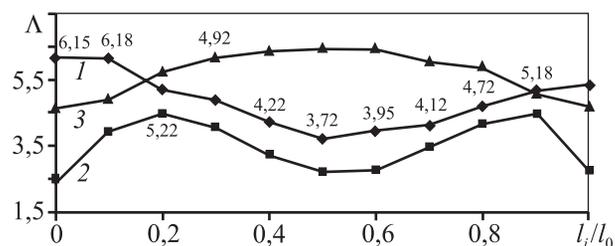


Рис. 7. Распределение  $\Lambda$  по продольному сечению заготовки при протяжке в плоских бойках с относительной подачей 1,0. Сечение 1 –  $D_i/D_0 = 0,9$ , 2 –  $0,75$ , 3 –  $0,5$

— кантовка заготовки на  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  и обжатие 10 % независимо от величины относительной подачи приводят к локализации деформации на поверхности заготовки, а увеличение единичного обжатия до 20 % позволяет сосредоточить ее интенсивность от поверхности до центра (см. рис. 6); при этом с ростом обжатия происходит разворот участка с максимальными деформациями по сечению заготовки;

— при ковке круглой заготовки в плоских бойках с углами кантовки  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  и  $180^\circ$  из-за разворота зон с максимальными деформациями по ее сечению интенсивно развиваются макросдвиговые деформации по очагу деформации, что будет вызывать глубокие изменения в структуре и свойствах металла за счет измельчения его исходной структуры, такие как повышение уровня и однородности механических характеристик материала, а также снижение их анизотропии.

Анализ эпюр изменения  $\Lambda$  по сечению заготовки при протяжке с углом кантовки  $30^\circ$  и относительной подачей  $S = 0,8 \div 1,0$  показывает, что при рациональном режиме деформирования степень деформации сдвига имеет наибольшие значения в прилегающих к инструменту зонах заготовки (рис. 7), а также в ее центральных слоях, а наименьшие — в поверхностных.

Таким образом, результаты расчета степени деформации сдвига показали, что равномерного распределения  $\Lambda$  по сечению деформируемой заготовки можно достичь при совмещенной протяжке в плоских бойках на первом этапе обработки и РКМ на втором. В обоих случаях угол кантовки составляет  $30^\circ$  и относительная подача — 1,0.

## Выводы

1. Показано, что при протяжке на РКМ с углом кантовки  $30^\circ$  степень деформации сдвига имеет наибольшее значение на участках, прилегающих к по-

верхности заготовки, а наименьшее — в центральной зоне заготовки.

2. Установлено, что при рациональном режиме деформирования в плоских бойках степень деформации сдвига максимальна в прилегающих к инструменту зонах, а также центральных слоях заготовки, а в поверхностных областях она минимальна.

3. Определено, что при протяжке круглой заготовки по схеме «круг—круг» равномерное по ее сечению распределение степени деформации сдвига достигается при совмещенной протяжке в плоских бойках и на РКМ с углами кантовки  $30^\circ$  и относительными подачами 1,0 на обеих стадиях обработки.

## Литература

1. Антощенко Ю.М., Тюрин В.А. // Расчет напряжений и деформаций: Сб. науч. тр. ЭПИ МИСиС. Изд-во «Электросталь», 2002. С. 195—205.
2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005.
3. Добычин И.А., Рыбкин М.В. // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 5. С. 108—112.
4. Власов А.В., Погорильчук (Дмитриева) А.Я. // Наука и образование: Эл. науч.-техн. изд. 2009. № 9. URL: <http://tecnomag.edu.ru/doc/132181.html>.
5. Машеков С.А., Смайлова Н.Т., Нуртазаев А.Е. Технологияковки в инструменте с изменяющейся формой. «LAP Lambert Academic Publishing», 2012.
6. Карамышев А.П., Некрасов И.И., Паршин В.С., Сыстеров В.А. // Металлург. 2009. № 3. С. 61—63.
7. Погорильчук А.Я. // Наука и образование. 2009. № 9. С. 31—38.
8. Лазоркин В.А., Яценко Р.В., Мельников Ю.В. // Кузн.-штамп. пр-во. 2005. № 5. С. 8—11.
9. Тюрин В.А., Лазоркин В.А., Поспелов И.А. Ковка на радиально-обжимных машинах. М.: Машиностроение, 1990.
10. Добычин И.А., Рыбкин М.В. // Изв. вузов. Машиностроение. 1988. № 9. С. 131—135.
11. Манегин Ю.В., Степанов В.П., Лузин Ю.Ф. и др. // Кузн.-штамп. пр-во. 1981. № 10. С. 17—20.
12. Воронцов В.К., Петров В.А., Матвеев Д.Б., Туан Као Ань // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1989. № 1. С. 74—78.
13. Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учеб. пос. СПб.: ИМАШ РАН, 2000.