УДК 621.98:539.37

В.П. Романенко, А.А. Золотарев, Д.В. Сизов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ СПЛОШНЫХ ЗАГОТОВОК БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. На основе результатов компьютерного моделирования в программном комплексе Deform 3D показана возможность получения полых колесных заготовок из гильз, полученных на станах винтовой прокатки. Представлены результаты моделирования операции винтовой прошивки крупных слитков в двухвалковом стане винтовой прокатки.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; формоизменение металла; винтовая прошивка.

LARGE DIAMETER MONOLITE ROUND BILLETS TWO-ROLL SCREW PIERCING MODELLING WITH FINITE ELEMENTS METHOD

Abstract. On the basis of results of computer modeling in program complex Deform 3D the possibility of production of hollow wheel billets from pipes obtained by helical rolling mills are shown. Results of modeling operations of screw broaching large ingots on a two-roll helical rolling mill are presented.

Keywords: computer modeling, metal forming, screw broaching.

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационного ресурса железнодорожных колес является использование предварительно деформированной колесной заготовки. Анализ способов деформирования (например, ковка, продольная прокатка и др.) крупных слитков и непрерывнолитых заготовок диам. 440 – 500 мм показал, что наиболее приемлемым для этой цели является винтовая прокатка, прошивка.

Установлено, что процесс винтовой прокатки, прошивки характеризуется высокими сдвиговыми деформациями, которые интенсивно раздробляют исходную дендритную структуру металла даже при небольших обжатиях [1]. Таким образом, винтовая прошивка является новым высокоэффективным процессом получения полых колесных заготовок с интенсивно проработанной структурой литого металла и повышенными пластическими свойствами [2].

Исследованию процесса винтовой прошивки заготовок посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных авторов. В настоящее время получило развитие построение математических и компьютерных моделей процессов ОМД и, в частности, винтовой прокатки, прошивки в системах инженерного анализа Q Form, Deform 3D, ANSYS и др. [3]. В работе [3] представлена математическая модель процесса винтовой прошивки полой заготовки диам. 474 мм с малым осевым отверстием при больших обжатиях в особотолстостенные гильзы в двухвалковом стане винтовой прокатки; рассмотрены основные этапы формоизменения и проанализировано напряженно-деформированное состояние металла в процессе деформации и после прошивки.

В настоящей работе разработано компьютерное моделирование процесса винтовой прошивки сплошных заготовок большого диаметра в двухвалковом стане винтовой прокатки с соотношением наружного диаметра гильзы к толщине стенки $D/S = 3{,}2$ на основе метода конечных элементов и Лагранжева описания движения сплошной среды [4, 5].

Для математического моделирования процессов ОМД была выбрана FEM CAD система Deform 3D [6].

В процессе исследования определялись параметры напряженно-деформированного состояния металла, накопленная степень деформация по объему заготовки, характер развития деформации, время прошивки, геометрия входной и выходной утяжек, геометрические размеры конечной гильзы (наружный и внутренний диаметр, длина), температурные поля, энергосиловые параметры. Значительное внимание в работе уделяется значениям накопленной степени деформации и полям распределения деформаций по объему заготовки как показателям, контролирующим проработку структуры металла [7]. Данная работа выполнена с целью дальнейшего сопоставления результатов компьютерного моделирования с реальным процессом винтовой прошивки заготовок большого диаметра в двухвалковом стане.

Одними из основных параметров, влияющих на накопленную степень деформации металла, являются величина обжатия заготовки валками в пережиме ε и коэффициент вытяжки μ [7].

Для достижения высоких степеней деформации при заданном внутреннем диаметре гильзы прошивку заготовок осуществляли с обжатием в пережиме 16 % на оправке диам. 160 мм.

При высоких значениях обжатия заготовки в пережиме валков в очаге деформации прошивного стана, например 15 – 20 %, возможно вскрытие осевой полости. В связи с этим очаг деформации строится таким образом, чтобы происходило ослабление центральной зоны, но макроразрушения отсутствовали. Оправка выдвигается на 140 мм за пережим валков в сторону подачи заготовки, что с учетом разворота валков на угол подачи дает обжатие перед носком оправки 8 %.

Расчеты показали, что для обеспечения обжатия в пережиме 16 % необходимо выполнить калибровку входного участка валков с большими углами конусности (для углов подачи $\beta = 10 – 15°$ угол $\varphi = 6 \div 8°$), что будет затруднять захват заготовки валками. В связи с этим предложена калибровка валка с тремя участками: участок захвата (угол конусности 3°), участок повышенного обжатия (угол конусности 5°) и выходной участок с углом конусности 3°. Для улучшения условий вторичного захвата при компьютерном моделировании процесса прошивки на валках предусматривались насечки.

Калибровка рабочего инструмента и режим деформирования назначались в соответствии с рекомендациями, представленными в работе [8].

Использовались следующие параметры настройки стана:

- величина обжатия в пережиме $\varepsilon = 16$ %;
- диаметр валков $D = 1000$ мм;
- длина бочки валка $L = 1000$ мм;
- угол входного конуса валков $\varphi_{вх} = 3°$;
- угол конуса участка повышенного обжатия 5°;
- угол выходного конуса валков $\varphi_{вых} = 3°$;
- диаметр оправки $d = 160$ мм;
- выдвижение оправки за пережим 140 мм;
- отношение диаметра гильзы к толщине стенки $D / S = 3{,}2$;
- угол подачи $\beta = 12°$;
- угол раскатки $\alpha = 0°$;
- коэффициент овализации $\xi = 1{,}15$.

В программе SolidWorks были созданы трехмерные модели рабочего инструмента прошивного стана, их компоновка в пространстве в соответствии с заданными параметрами. Разработан рабочий инструмент, включающий рабочие валки, направляющие линейки, оправку, стержень, толкатель, входной и выходной желоба. После позиционирования рабочего инструмента и заготовки – построения очага деформации, сборка переносилась в рабочую среду Deform 3D. Компоновка рабочего инструмента прошивного двухвалкового стана со сплошной литой заготовкой большого диаметра представлена на рис. 1.

В соответствии с методом конечных элементов, геометрическая модель заготовки разбивается на конечные элементы (КЭ), представляющие собой тетраэдры, длина ребер которых находится в заданных пределах. Данные КЭ имеют одинаковые упругопластические свойства.

В постановке задачи винтовой прошивки приняты следующие допущения:

- рабочий инструмент прошивного стана является абсолютно жестким телом с постоянной температурой;
- трение между заготовкой и рабочим инструментом подчиняется закону сухого трения Амонтона–Кулона и коэффициент трения постоянен по всей поверхности контакта;
- материал обрабатываемого тела принят несжимаемым с постоянным по времени объемом.

При моделировании процесса прошивки заготовок использованы следующие исходные данные, введенные в препроцессор вычислительной системы Deform 3D.

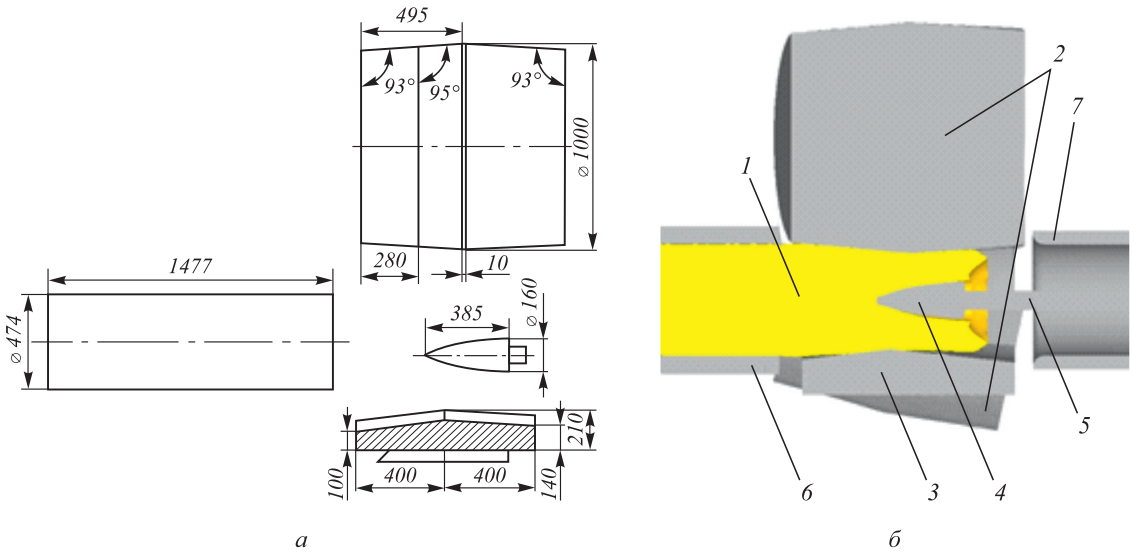

Рис. 1. Очаг деформации стана винтовой прокатки с геометрическими размерами (*а*) и в DEFORM 3D (*б*):
1 – заготовка; *2* – рабочие валки; *3* – направляющие линейки; *4*, *5* – оправка со стержнем; *6* – входная проводка; *7* – выходная проводка

1. Вид технологического процесса:
– прошивка на двухвалковом стане винтовой прокатки сплошной заготовки.
2. Параметры заготовки:
– цилиндрическая сплошная заготовка размером 474×1422 мм;
– температура заготовки – 1200 °С;
– материал – сталь 60 по ГОСТ 7414 – 75;
– вид моделируемых процессов в заготовке – пластическая деформация.
3. Параметры инструмента:
– скорость вращения валков 60 об/мин;
– калибровка валков и геометрические параметры линеек соответствуют рекомендациям по калибровке рабочего инструмента;
– температура валков 30 °С, линеек, оправки, входного и выходного желобов, заталкивателя – 20 °С;
– материал смазки соответствует коэффициенту трения 0,25;
– параметр трения между заготовкой и валками – 0,7.
4. Вид разбиения заготовки:
– тип конечных элементов – тетраэдр;
– число элементов – 100 000;
– в приконтактных зонах заготовки с валками и оправкой установлены окна плотности конечных элементов.

Подача заготовки в раствор рабочих валков осуществлялась заталкивателем. В дальнейшем поступательное движение заготовки происходило за счет сил трения на контактной поверхности металла с валками.

На рис. 2 представлены основные этапы процесса прошивки заготовки: вторичный захват (*а*), установившаяся стадия (*б*, *в*), выход заготовки из очага деформации (*г*, *д*), полученная гильза (*е*).

На рис. 2 можно проследить изменение степени деформации по Мизесу в процессе прошивки. Вследствие чего можно заключить, что слиток почти весь претерпевает пластическую деформацию, причем деформация от оправки больше, чем от валков, что совпадает с результатами теоретического исследования [2]. Как результат была получена полая деформированная гильза с проработанной внутренней структурой, что и требовалось.

В сравнении с результатами, полученными при прошивке полой заготовки в работе [3], величины деформаций в приконтактных зонах заготовки к валкам и оправке больше на 10 – 20 %, а в центральной зоне на 20 – 25 %.

Представленный способ моделирования процесса прошивки заготовок в двухвалковом стане позволяет получить такие выходные данные, как распределение

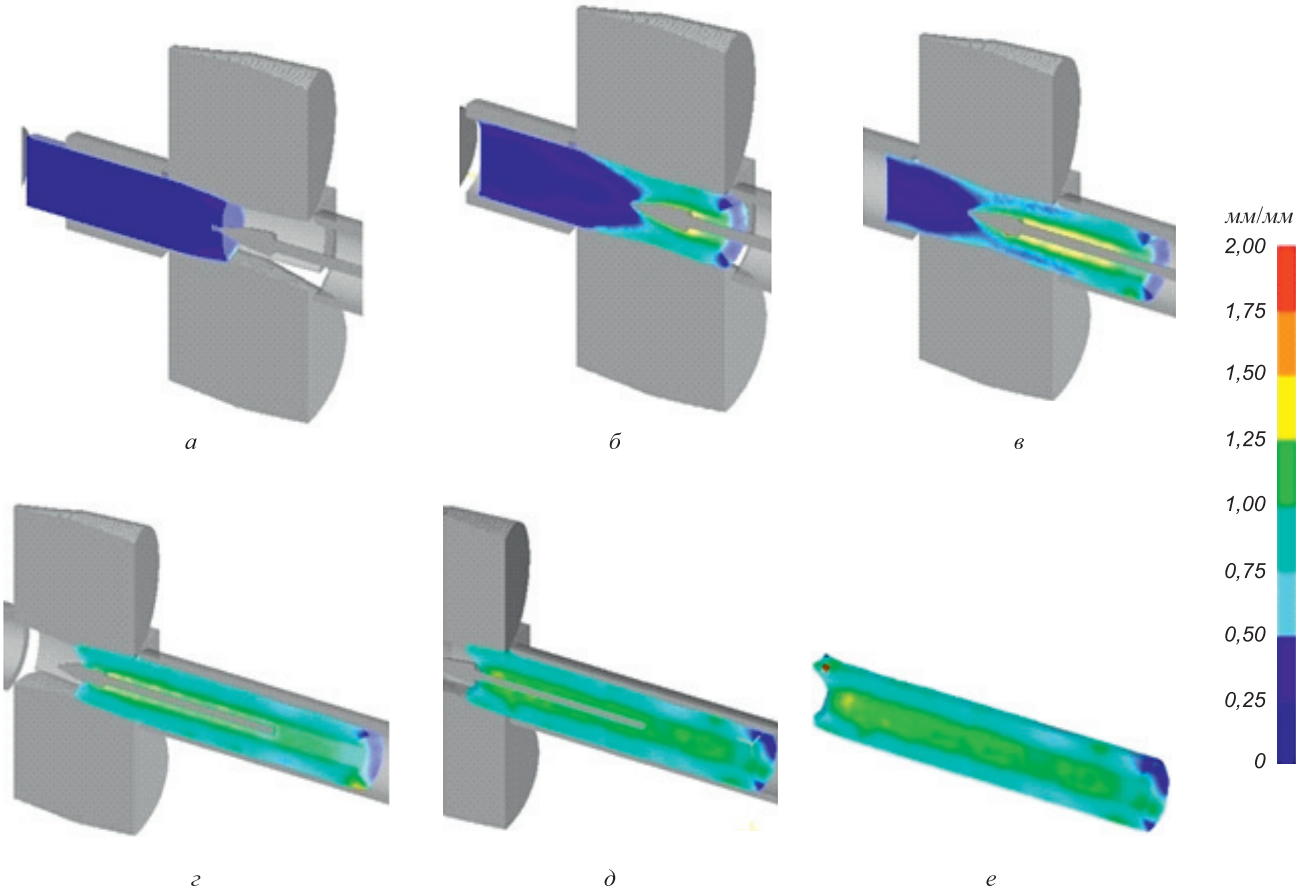

Рис. 2. Стадии формоизменения при прошивке сплошной заготовки с распределением полей деформации по Мизесу: вторичный захват (*а*); установившаяся стадия (*б*, *в*); выход заготовки из очага деформации (*г*, *д*); полученная гильза (*е*)

интенсивности деформаций, главные деформации (ε_1, ε_2, ε_3), нормальные деформации по осям, деформации сдвига, интенсивность напряжений, главные напряжения (σ_1, σ_2, σ_3), нормальные напряжения по осям, касательные напряжения, температурные поля, скорости деформаций, скорость изменения интенсивности деформаций [9], время контакта заготовки с валками, площадь заготовки, энергосиловые параметры, крутящие моменты, площадь контакта заготовки с валками и др.

Выводы. Разработана компьютерная модель процесса винтовой прошивки сплошных заготовок диам. 474 мм при повышенных обжатиях в особотолстостенные гильзы с соотношением D/S = 3,2 в двухвалковом стане винтовой прокатки.

Изучение деформированного состояния по объему заготовки выявило следующие закономерности распределения деформации: наибольшие значения деформации по Мизесу находятся в приконтактных зонах с валками и оправкой, причем в осевых слоях (зона контакта с оправкой) деформации больше и достигают значений 1,8, а в периферийных слоях (зона контакта с валками) деформация достигает значения 1,1 (рис. 3). В средних слоях заготовки значение деформации достигает величины 0,9, что согласуется с результатами, полученными в работе [2].

Изучение характера распределения полей возникающих напряжений при прошивке выявило следующие закономерности: перед носком оправки в центральной зоне заготовки существуют растягивающие напряжения, ослабляющие ее, улучшая при этом условия внедрения и самоцентрирования оправки в очаге деформации (рис. 4, *а*, *б*); в приконтактной зоне к валкам присутствуют сжимающие напряжения (рис. 4, *а*, *б*, *в*), а вне контакта с ними – в сторону линеек – растягивающие (рис. 4, *а*, *в*); в зоне выхода гильзы из очага деформации присутствуют остаточные растягивающие напряжения (рис. 4, *а*, *г*), что согласуется с реальным процессом винтовой прошивки.

Разработанная модель процесса винтовой прошивки дополнительно с физическим моделированием позволяет более полно исследовать процессы прошивки с изучением распределения напряженно-деформированного состояния металла по зонам очага деформации, температурных условий при деформировании и других характеристик пластического формоизменения металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапов И.Н., Полухин П.И. Новая технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.

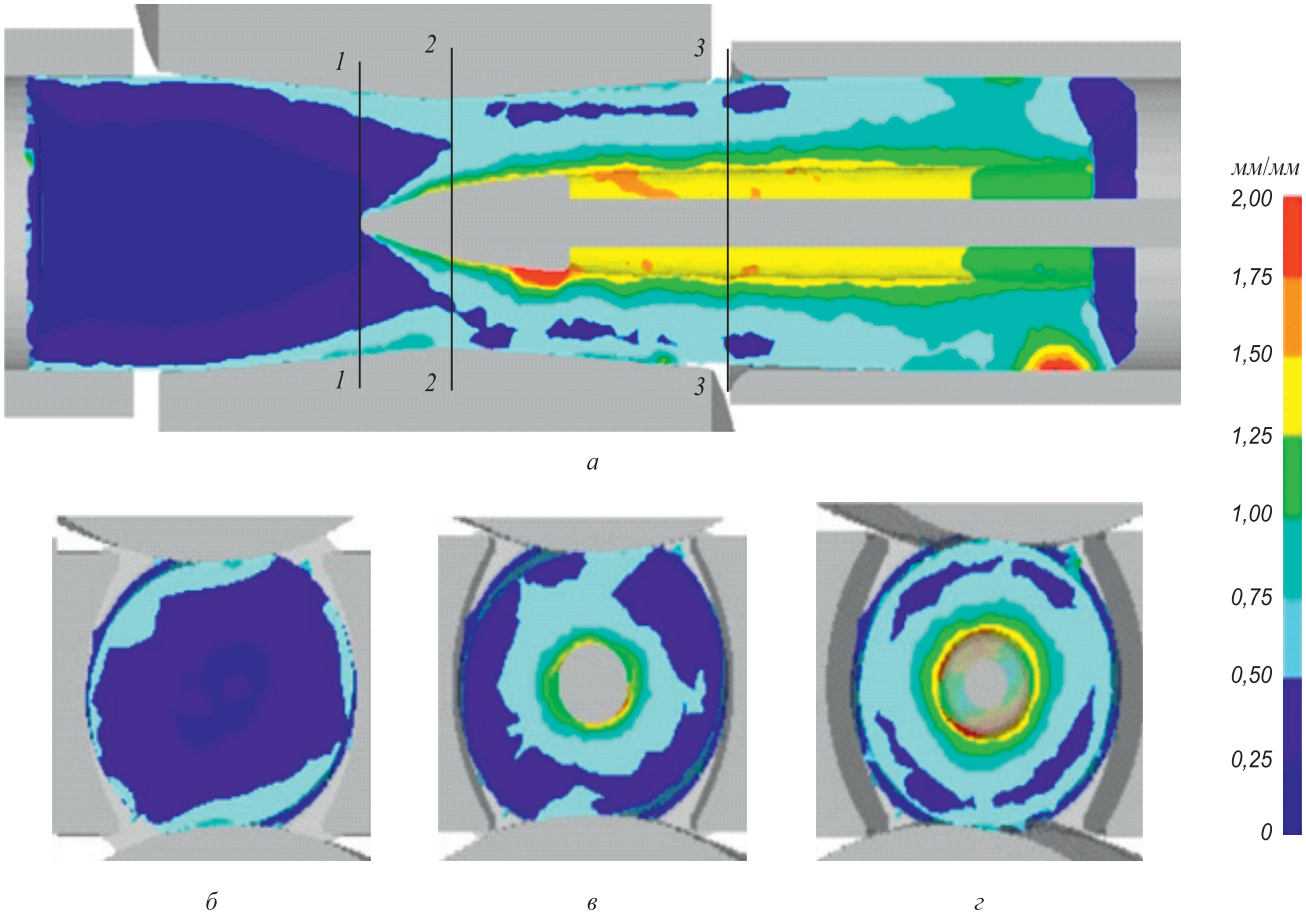

Рис. 3. Заготовка при установившейся стадии прошивки (*а*) и ее поперечные сечения 1–1 (*б*), 2–2 (*в*), 3–3 (*г*) с полями распределения деформаций по Мизесу

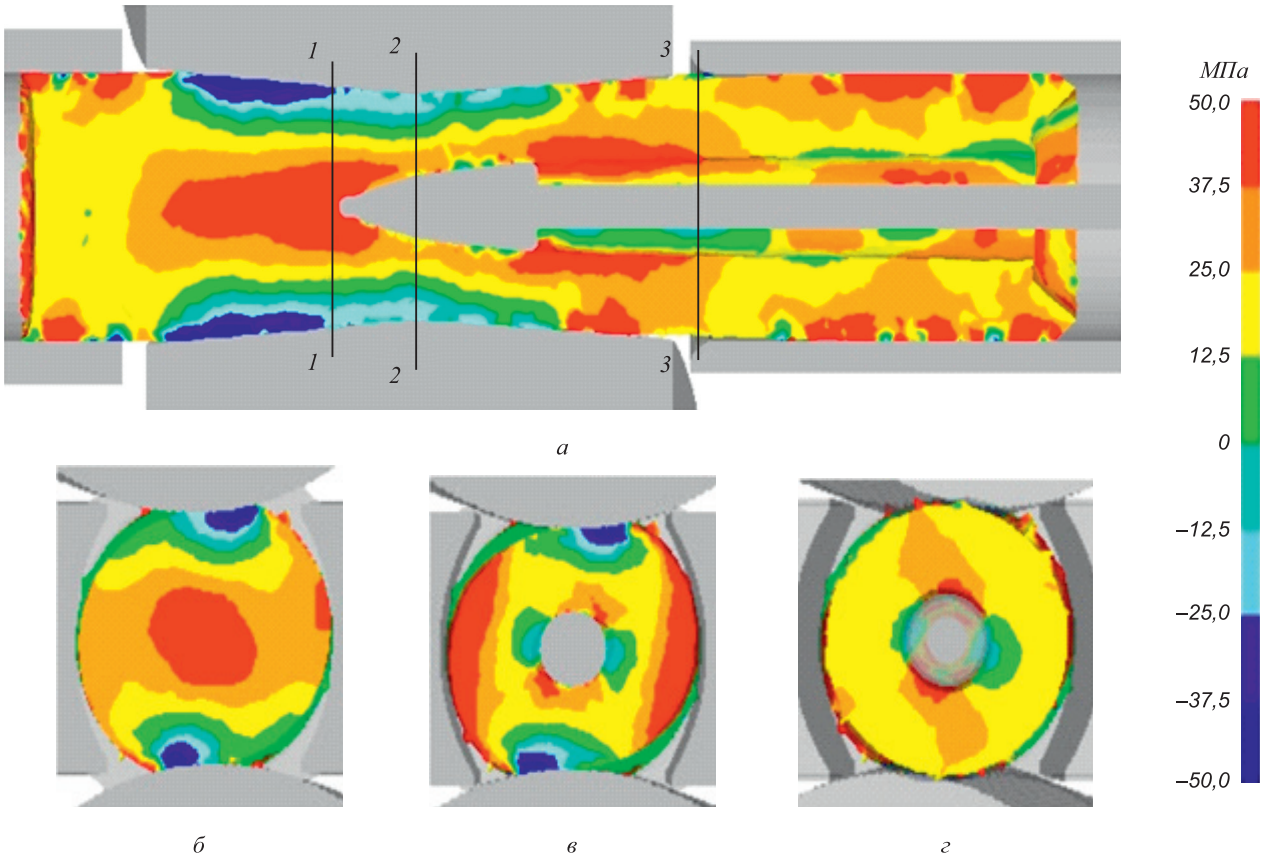

Рис. 4. Заготовка при установившейся стадии прошивки (*а*) и ее поперечные сечения 1–1 (*б*), 2–2 (*в*), 3–3 (*г*) с полями возникающих напряжений

2. Галкин С.П., Романцев Б.А. Неравномерность радиальных перемещений и деформации при прошивке в стане винтовой прокатке // Производство проката. 2009. № 9.
3. Романенко В.П., Сизов Д.В. Моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра в двухвалковом стане методом конечных элементов // Изв. вуз. Черная металлургия, 2011. № 3.
4. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Логос, 2004. – 390 с.
5. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
6. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1983. – 351 с.
7. Обработка металлов давлением. Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008. – 960 с.
8. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
9. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов. 3-е изд., испр. и доп. – Л.: Машгиз, 1978. – 368 с.

© 2013 г. *В.П. Романенко, А.А Золотарев, Д.В. Сизов*

Поступила 18 февраля 2013 г.