

## РАЗДЕЛ I МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.777; 004.942

Лежнев С. Н.  
Найзабеков А. Б.  
Панин Е. А.  
Койнов Т. А.  
Мазур И. П.

### РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА «ПРОКАТКА-РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ»

Уже не первое десятилетие во всем мире отмечается значительный интерес к развитию технологий, направленных на получение металлов и сплавов с субультрамелкозернистой структурой и использованию их в качестве конструкционных и функциональных материалов нового поколения. Это связано с тем, что измельчение структуры до ультрамелкозернистого состояния в сочетании с термической обработкой позволяет добиться в данных металлах и сплавах повышенного уровня механических и эксплуатационных свойств [1]. Добиться измельчения микроструктуры металлов и сплавов при обработке их давлением возможно путем реализации в процессе деформирования интенсивных пластических деформаций (ИПД) во всем деформируемом объеме. К таким методам можно отнести равноканальное угловое прессование (РКУП) [2] в матрицах различных конструкций, в том числе и РКУП в параллельных каналах [3], которые в условиях многоциклового обработки обеспечивают формирование ультрамелкозернистой структуры в заготовках с высоким коэффициентом использования металла. Но к сожалению данные технологии, как и большинство существующих в настоящее время технологий реализации интенсивной пластической деформации хоть и позволяют получать металлы и сплавы с субультрамелкозернистой структурой, но до настоящего момента промышленной реализации данные технологии не получили из-за слишком высокой себестоимости такого производства. Это, во-первых, связано с тем, что большинство из этих способов реализации ИПД не позволяют получать длинномерные заготовки с субультрамелкозернистой структурой, т.к. имеются ограничения по рабочему пространству инструмента, например, при прессовании на прессе исходная длина заготовки ограничивается рабочим ходом пуансона. А, во-вторых, чаще всего большинство известных способов реализации ИПД обеспечивают непрерывность процесса деформирования не в полной мере, так как после того, как все заготовки будут продеформированы, в матрице останется последняя, недодеформированная заготовка.

Поэтому разработка новых энергосберегающих технологий получения металлов и сплавов с субультрамелкозернистой структурой и с повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств методами ИПД в промышленных условиях в настоящее время является актуальной задачей.

Одной из таких технологий является совмещенная технология деформирования «прокатка-прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы (рис. 1,а), позволяющая устранить вышеназванный недостаток [4]. При реализации процесса деформирования по данной технологии заготовка последовательно прокатывается в первой паре горизонтальных валков, которые проталкивают ее через каналы равноканальной ступенчатой

матрицы. На выходе из матрицы заготовка попадает во вторую пару горизонтальных валков, которые вытягивают заготовку из матрицы. В результате реализации данного процесса на практике полностью снимаются ограничения по исходным размерам заготовок, и обеспечивается непрерывность процесса. В работах [5–7] было проведено изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) данной схемы деформации, а также металлографические исследования алюминиевых и медных сплавов, продеформированных по данной технологии. В ходе данных исследований было доказано преимущество предлагаемой технологии по сравнению с обычным равноканальным угловым прессованием.

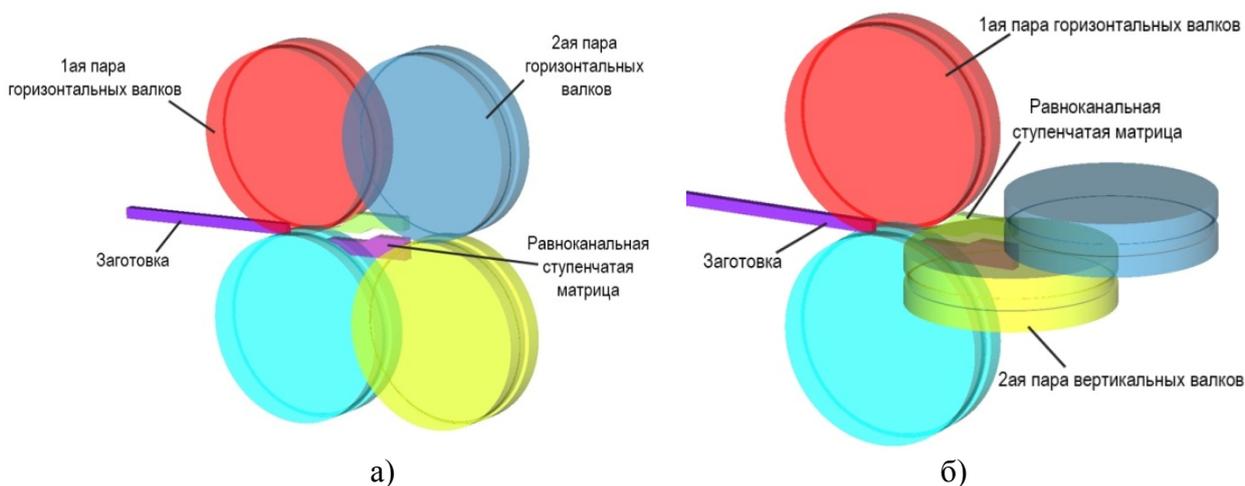


Рис. 1. Новая конструкция совмещенного процесса «прокатка-прессование»

Однако, из работы [8] известно, что для получения ультрамелкозернистой структуры в заготовке в процессе деформирования необходимо развить эквивалентную деформацию, превышающую  $\epsilon=3$ . В связи с этим, для получения такого уровня деформации при реализации совмещенного процесса «прокатка – прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы нужно осуществить не менее трех циклов деформирования. При этом при деформировании по данной схеме заготовка будет несколько раз получать обжатие по высоте при прокатке в горизонтальных парах валков, что в результате приведет к существенному изменению размеров и формы исходного поперечного сечения, что зачастую является нежелательным, а, иногда, и негативным фактором.

Поэтому данная схема была усовершенствована путем замены второй пары горизонтальных валков на вертикальные валки (рис. 1, б). Таким образом, после выхода из матрицы, заготовка будет получать обжатие не по высоте, как раньше, а по ширине. В результате изменение формы и размеров поперечного сечения будет не таким интенсивным.

Поскольку предложенная конструкция совмещенного процесса представляет собой новую схему деформации, то в этой связи требуется тщательное изучение особенностей новой модификации, включающее исследование напряженно-деформированного состояния, формоизменения заготовки, а также эволюции микроструктуры.

В последние годы при разработке или исследовании того или иного технологического процесса, в том числе и технологических процессов обработки металлов давлением, все чаще используется математическое моделирование, поскольку оно позволяет исследователю заглянуть «внутрь» процесса, оценить возникающие напряжения и деформации, предсказать появление дефектов. Помимо этого, при помощи моделирования появляется возможность выявить рациональные параметры инструмента и заготовки для наилучшего протекания процесса, минуя дорогостоящие эксперименты. Для моделирования процессов обработки металлов давлением уже давно используют различные программные комплексы.

В нашем случае анализ проводился с использованием виртуального моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Simufact.Forming. Размеры исходной заготовки 20x15x300 мм. Условия и допущения, принятые при моделировании в программном комплексе Simufact.Forming:

- материал заготовки в исходном состоянии (до деформации) являлся изотропным и в нем отсутствовали начальные напряжения и деформации;
- на заготовке была создана сетка из 180 000 конечных элементов; средняя длина грани элемента была равна 0,6 мм;
- начальная температура заготовки принималась равной 1150 °С, присутствовал деформационный разогрев и теплопередача между заготовкой, инструментом и окружающей средой;
- инструмент принимался абсолютно жестким; геометрия инструмента (3D модель) была создана с использованием программы КОМПАС 3D V15 и сохранена с расширением stl;
- модель материала исходной заготовки принимался упруго-пластичной;
- материал, принятый при моделировании – сталь AISI 1015, соответствующая стали 15, кривые упрочнения были взяты из библиотеки Simufact. Forming;
- коэффициенты трения между инструментом и заготовкой были выбраны на основе рекомендаций из работы [4] и приняты равными 0,5 на контакте заготовки с валками; 0,1 на контакте заготовки с матрицей;
- скорость вращения валков - 60 об/мин.

В работе [9] было установлено, что наиболее эффективным способом реализации данного совмещенного процесса является использование калиброванных валков, поскольку в этом случае происходит интенсификация действия активных сил трения по всему периметру калибра, а также появляется возможность контроля уширения заготовки. Использование валков с гладкой бочкой может быть оправдано лишь тем фактом, необходимо на одной установке проводить деформирование заготовок с разной шириной. В этом случае необходимо учитывать уширение заготовки, на величину которого будет оказывать влияние противодействия со стороны матрицы [10]. В данном случае было принято решение использовать калиброванные валки.

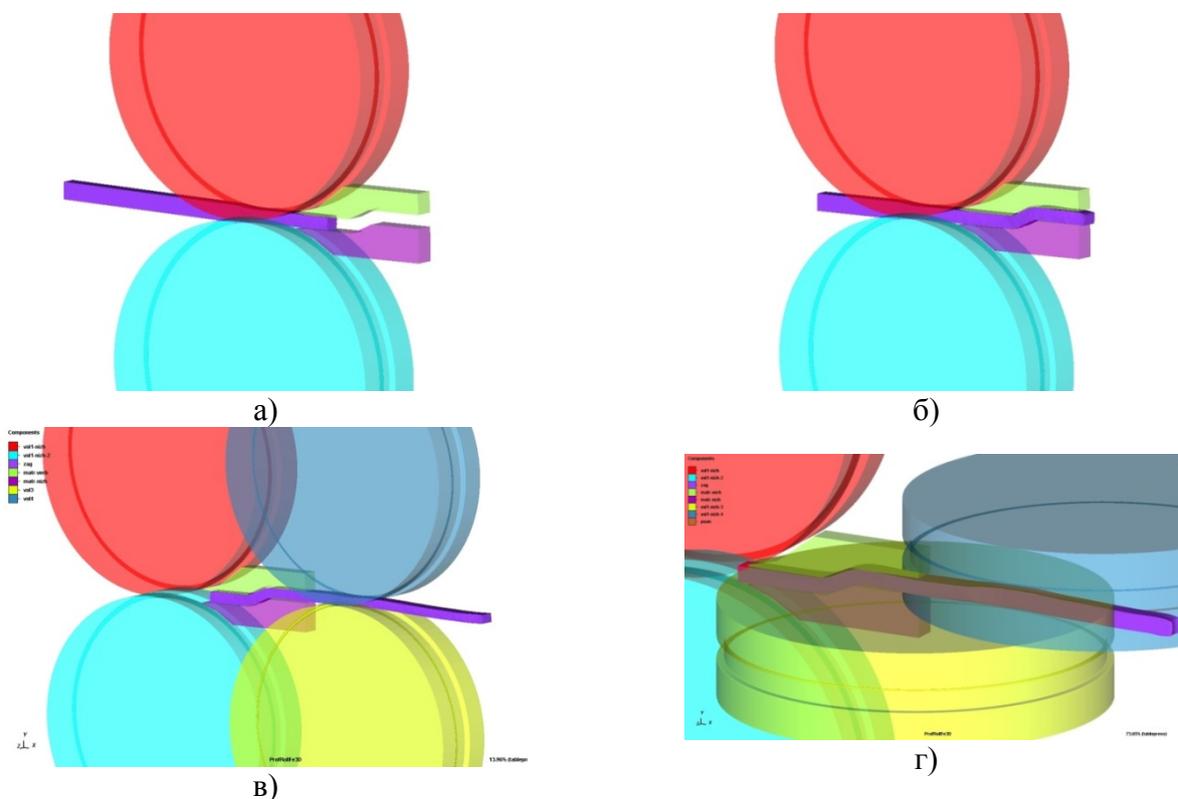


Рис. 2. Стадии совмещенного процесса:

а – прокатка в 1-ой паре валков; б – прессование в матрице; в – прокатка во 2-ой паре горизонтальных валков и выход из матрицы; г – прокатка во 2-ой паре вертикальных валков и выход из матрицы

В результате была получена успешная модель совмещенного процесса «прокатка-прессование». В ней заготовка последовательно захватывается первой парой горизонтальных валков (рис. 2, а, б), которые проталкивают ее через каналы равноканальной ступенчатой матрицы (рис. 2, в, г). На выходе из матрицы заготовка попадает во вторую пару валков, которые вытягивают заготовку из матрицы (рис. 2, д, е).

После получения готовой модели было проведено изучение следующих параметров:

- напряженно-деформированное состояние (эквивалентное напряжение и эквивалентная деформация);
- формоизменение заготовки (размеры поперечного сечения образца на выходе из второй пары валков);
- эволюция микроструктуры (средний размер зерна).

Полученные значения сравнивались с аналогичными данными из модели с двумя парами горизонтальных валков.

Результаты моделирования

#### А) Напряженное состояние

Как показало сравнение эквивалентного напряжения, в обоих случаях возникает схожая картина распределения данного параметра. На заготовке отчетливо видны три характерных зоны, определяющие ключевые стадии деформирования – два небольших очага деформации при прокатке в валках и один, достаточно протяженный очаг деформации при прессовании в матрице, возникающий в зоне стыка каналов (рис. 3, а, б).

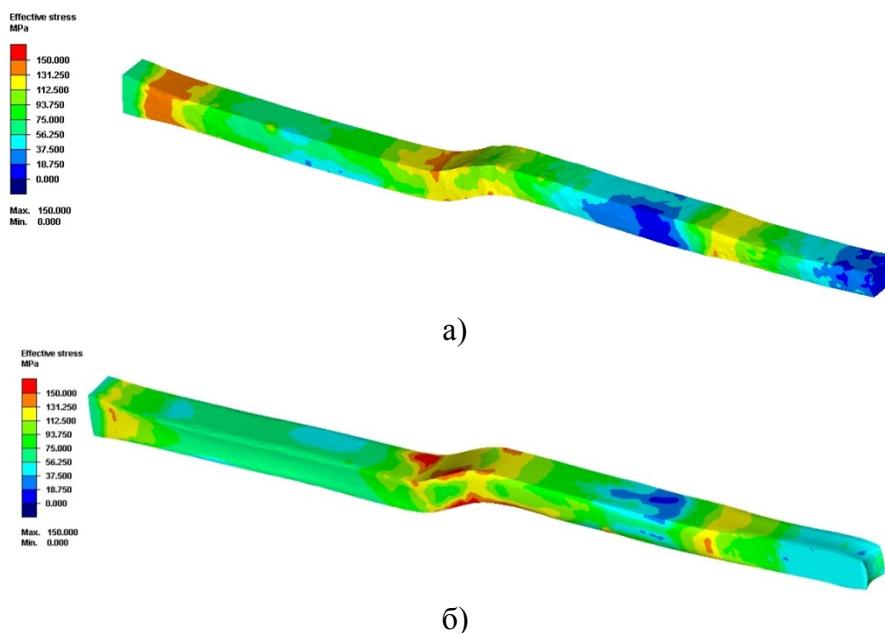


Рис. 3. Эквивалентное напряжение :

а – модель с горизонтальными валками на выходе из матрицы; б – модель с вертикальными валками на выходе из матрицы

Среднее значение напряжения в очагах деформации валков равно 110–120 МПа, в зоне стыка каналов матрицы оно достигает 135–145 МПа. Отличительной особенностью данного процесса в обоих вариантах является действие противодействия со стороны матрицы. Оно ярко проявляется на участке между зоной стыка каналов и очагом деформации 1-ой пары валков – по всей протяженности участка действует напряжение, достигающее 80–90 МПа. На участке между зоной стыка каналов и очагом деформации 2-ой пары валков влияние противодействия значительно меньше, поскольку после преодоления зоны стыка каналов, заготовка движется с определенной скоростью и попадает во 2-ую пару валков, диаметр которых обеспечивает не подпор, а небольшое натяжение. Здесь величина напряжения находится в пределах 40–50 МПа.

#### Б) Деформированное состояние

При анализе деформированного состояния было выявлено, что использование вертикальных валков приводит к более равномерному распределению эквивалентной деформации по всему объему деформируемой заготовки. Это отчетливо видно из результатов моделирования на рис. 4.

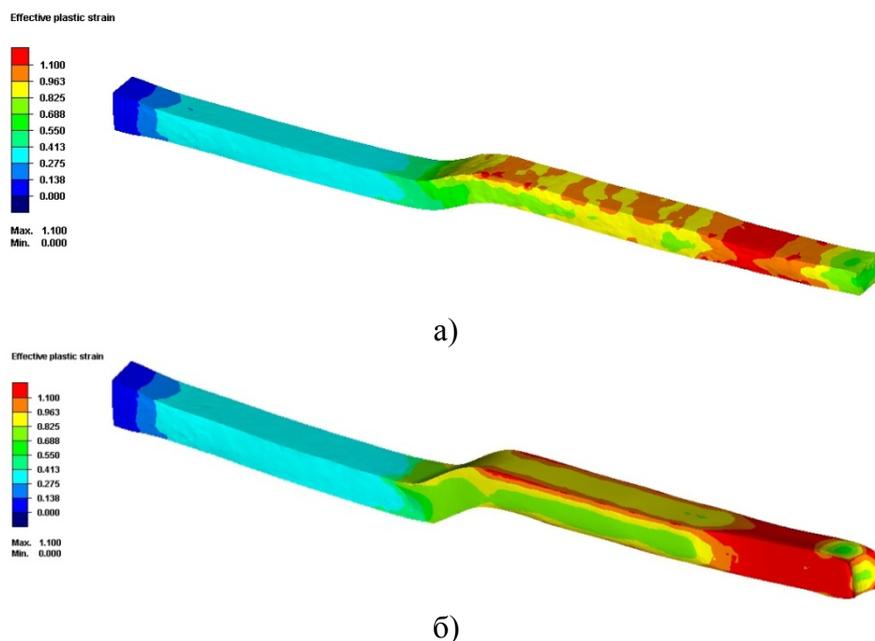


Рис. 4. Эквивалентная деформация:

а – модель с горизонтальными валками на выходе из матрицы; б – модель с вертикальными валками на выходе из матрицы.

В обоих вариантах уровень эквивалентной деформации достигает значения  $\epsilon=1$  и более за один проход. Однако при использовании горизонтальных валков на выходе накопление деформации идет только по высоте заготовки. В результате центральные слои заготовки прорабатываются менее интенсивно, чем поверхностные (рис. 4, а). Использование вертикальных валков позволяет осуществлять обжатие заготовки по ширине, что, по сути, равносильно кантовке заготовки на 90 градусов. В результате распределение эквивалентной деформации после прокатки в вертикальных валках является более равномерным по всему объему заготовки.

#### В) Формоизменение заготовки

Ключевым параметром при изучении формоизменения заготовки в ходе данного совмещенного процесса являются размеры поперечного сечения образца на выходе из второй пары валков. Исходная заготовка имела размеры поперечного сечения  $h_0 \times b_0 = 20 \times 15$  мм; площадь поперечного сечения составила  $300 \text{ мм}^2$ . После обжатия в первой паре валков размеры поперечного сечения составили  $h_1 \times b_1 = 15 \times 18,2$  мм; площадь поперечного сечения была равна  $273 \text{ мм}^2$ ; коэффициент вытяжки составил  $\lambda_1 = 1,098$ .

После обжатия во второй паре горизонтальных валков размеры поперечного сечения  $h_{2Г} \times b_{2Г} = 12 \times 19,8$  мм; площадь поперечного сечения была равна  $237,6 \text{ мм}^2$ ; коэффициент вытяжки составил  $\lambda_{2Г} = 1,149$ .

После обжатия во второй паре вертикальных валков размеры поперечного сечения  $h_{2В} \times b_{2В} = 15 \times 16,9$  мм; площадь поперечного сечения была равна  $253,5 \text{ мм}^2$ ; коэффициент вытяжки составил  $\lambda_{2В} = 1,076$ .

Таким образом, установлено, что использование вертикальных валков на выходе из матрицы позволяет осуществлять данный совмещенный процесс «прокатка-прессование» при значительно меньших значениях вытяжки, что влечет за собой незначительное изменение исходных размеров заготовки.

#### Г) Эволюция микроструктуры

Для изучения эволюции микроструктуры была использована специализированная база данных микроструктуры программы MATILDA. Данная программа является инструментом

моделирования физико-химических процессов, протекающих в деформируемом теле и является модульной надстройкой к программе SIMUFACT. MATILDA использует данные напряженно-деформированного состояния, скорости деформации и температуры из готовой рассчитанной модели в SIMUFACT.forming, дополняет их данными физико-химических свойств и их поведения для заданного материала и его структуры из собственной базы данных, затем, по алгоритму YADA [11], рассчитывает параметры процессов статической и динамической рекристаллизации, которые влияют на изменение размеров зерна. Размер зерна также рассчитывается для каждого узла конечно-элементной модели и отображается в конце моделирования в любой удобной для визуализации форме.

При моделировании микроструктуры в программе используется допущение, что заготовка до деформирования имеет равномерную структуру с одинаковым размером зерна в любой точке. В качестве исходного размера был принят средний диаметр зерна 40 мкм. В результате были получены картины изменения размера зерна, представленные на рис. 5 а и б.

При прокатке в первой паре валков поверхностные слои заготовки подвергаются интенсивной деформации, что способствует значительному измельчению зерна с 40 мкм до 30 мкм. После прохождения каналов матрицы за счет реализации деформации сдвига происходит дальнейшее измельчение зерна до 22 мкм. После второй пары горизонтальных валков размер зерна на поверхности заготовки составляет 18 мкм.

Центральные слои заготовки во время прокатки в первой паре валков прорабатываются менее интенсивно – здесь размер зерна меняется с 40 мкм до 32 мкм. После прохождения каналов матрицы размер зерна в центральной зоне изменяется с 32 мкм до 28 мкм. После второй пары горизонтальных валков размер зерна в центральной части заготовки составляет 25 мкм.

При использовании вертикальных валков на выходе из матрицы проработка и поверхностной, и центральной зоны идет более интенсивно. Средний размер зерна на поверхности составляет 15 мкм; в центральной зоне – 20 мкм. Сводные результаты расчета микроструктуры представлены на рис. 5, в.

Таким образом, в ходе изучения эволюции микроструктуры было установлено, что при использовании вертикальных валков на выходе из матрицы достигается двойной положительный эффект. Во-первых, зерно измельчается более интенсивно как на поверхности, так и в центральной зоне, что напрямую связано с изменением направления обжатия заготовки. Во-вторых, проработка структуры металла идет более равномерно, о чем говорит разница значений размера зерна между центральной и поверхностной зонами в обоих рассмотренных вариантах.

## ВЫВОДЫ

В ходе проведенного моделирования было проведено исследование новой модификации совмещенного процесса «прокатка-прессование», отличительной особенностью которой является использование вертикальных валков на выходе из матрицы. Было проведено изучение напряженно-деформированного состояния, формоизменения заготовки и эволюции микроструктуры. Полученные значения сравнивались с аналогичными данными модели с двумя парами горизонтальных валков. В результате было установлено, что использование вертикальных валков на выходе из равноканальной ступенчатой матрицы имеет следующие преимущества: проработка заготовки идет более равномерно по всему сечению; в целом, за счет изменения направления обжатия при прокатке в вертикальных валках деформирование происходит при значительно меньших значениях вытяжки, что влечет за собой незначительное изменение исходных размеров заготовки; исходный размер зерна измельчается более интенсивно как на поверхности, так и в центральной зоне, а также более равномерно.

Полученные результаты будут в дальнейшем нами использованы при разработке и проектировании опытно-лабораторной установки для реализации новой схемы совмещенного процесса «прокатка-равноканальное угловое прессование».

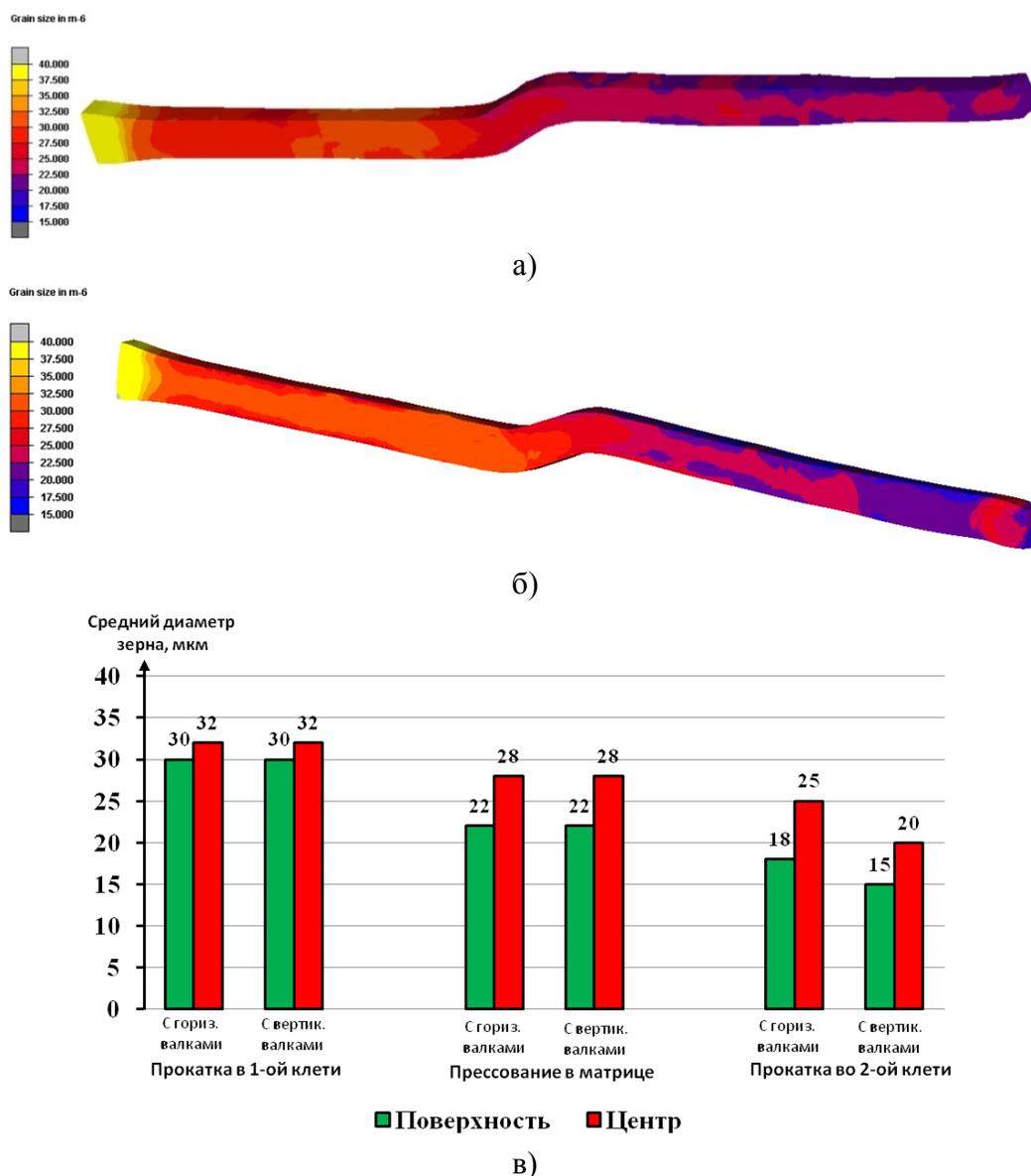


Рис. 5. Изменение размера зерна в продольном сечении заготовки:  
 а – модель с горизонтальными валками на выходе из матрицы; б – модель с вертикальными валками на выходе из матрицы; в – сводная диаграмма расчета размера зерна

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC* / M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, V. U. Kazykhanov et al. // *Journal of Materials Science*. – 2013. – №48. – P. 4501–4509.
2. Valiev R.Z. *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement* / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – №51. – P. 881–981.
3. Raab G.I. *Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels*, *Mat. Sci. Eng.*, 2005, A 410–411, 230–233.
4. Lezhnev S. N. *Theoretical studies of the joint «extrusion-rolling» process aimed at making sub-ultra fine grained structure metal* / S.N. Lezhnev, A.B. Naizabekov, Ye.A. Panin // *20<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (Metal 2011)*. – May 18–20. 2011. – Brno, Czech Republic. – P. 272–277.
5. Lezhnev S. *Investigation of the Influence of Geometric and Technological Factors on the Stress-Strain State of Metal in the Implementation of the Combined Rolling-Pressing Process* / S. Lezhnev, E. Panin // *Advanced Materials Research*. – 2014. – №936. – P. 1918–1924.
6. *Influence of Combined Process «Rolling-pressing» on Microstructure and Mechanical Properties of Copper* / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Procedia Engineering*. – 2014. – №81. – P. 1499–1504.
7. Lezhnev S. *Research of Combined Process «Rolling-Pressing» Influence on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium* / S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Advanced Materials Research*. – 2013. – №814. – P. 68–75.

8. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов и др. – Академия наук Беларуси. Физико-технический институт. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.

9. Найзабеков А.Б. Сравнительный анализ процесса «прокатка-прессование» в равноканальной ступенчатой матрице при использовании калиброванных валков и валков с гладкой бочкой / А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин // *Технология производства металлов и вторичных материалов*. – 2007. – №1. – С. 116–122.

10. Study of broadening in a combined process «rolling – pressing» using an equal-channel step die / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, T. Koinov // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2015. – Vol.50. – Iss.3. – P. 308–313.

11. Strength and structural-changes under high strain-rate hot deformation of C-steels / H. Yada, N. Matsuzu, K. Nakajima, K. Watanabe, H. Tokita // *Trans. ISIJ.* – 1983. – №23. – P. 100–109.

## REFERENCES

1. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC / M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, V. U. Kazykhanov et al. // *Journal of Materials Science.* – 2013. – №48. – P. 4501–4509.

2. Valiev R.Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // *Prog. Mater. Sci.* – 2006. – №51. – R. 881–981.

3. Raab G.I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels, *Mat. Sci. Eng.*, 2005, A 410–411, 230–233.

4. Lezhnev S. N. Theoretical studies of the joint «extrusion-rolling» process aimed at making sub-ultra fine - grained structure metal / S.N. Lezhnev, A.B. Naizabekov, Ye.A. Panin // *20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (Metal 2011)*. – May 18–20. 2011. – Brno, Czech Republic. – R. 272–277.

5. Lezhnev S. Investigation of the Influence of Geometric and Technological Factors on the Stress-Strain State of Metal in the Implementation of the Combined Rolling-Pressing Process / S. Lezhnev, E. Panin // *Advanced Materials Research.* – 2014. – №936. – R. 1918–1924.

6. Influence of Combined Process «Rolling-pressing» on Microstructure and Mechanical Properties of Copper / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Procedia Engineering.* – 2014. – №81. – R. 1499–1504.

7. Lezhnev S. Research of Combined Process «Rolling-Pressing» Influence on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium / S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // *Advanced Materials Research.* – 2013. – №814. – R. 68–75.

8. Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov / V.M. Segal, V.I. Reznikov, V.I. Kopylov i dr. – Akademiya nauk Belarusi. Fiziko-tehnicheskij institut. – Minsk: Nauka i tehnika, 1994. – 232 s.

9. Najzabekov A.B. Sravnitel'nyj analiz processa «prokatka-pressovanie» v ravnokanal'noj stupenchatoj matrice pri ispol'zovanii kalibrovannyh valkov i valkov s gladkoj bochkoy / A.B. Najzabekov, S.N. Lezhnev, E.A. Panin // *Tehnologija proizvodstva metallov i vtorichnyh materialov*. – 2007. – №1. – S. 116–122.

10. Study of broadening in a combined process «rolling – pressing» using an equal-channel step die / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, T. Koinov // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2015. – Vol.50. – Iss.3. – R. 308–313.

11. Strength and structural-changes under high strain-rate hot deformation of C-steels / H. Yada, N. Matsuzu, K. Nakajima, K. Watanabe, H. Tokita // *Trans. ISIJ.* – 1983. – №23. – P. 100–109.

Лежнев С. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД КГИУ

Найзабеков А. Б. – д-р техн. наук, проф. РИИ

Панин Е. А. – магистр, ст. преп. каф. ОМД КГИУ

Койнов Т. А. – д-р техн. наук, проф. каф. ОМД ХТМУ

Мазур И. П. – д-р техн. наук, проф. ЛГТУ

КГИУ – Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан;

РИИ – Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан;

ХТМУ – Университет химической технологии и металлургии, г. София, Болгария;

ЛГТУ – Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

E-mail: Sergey\_legnev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.05.2016 г.