

УДК 621.771.

Лежнев С. Н.
Волокитина И. Е.
Арбуз А. С.
Гайдаренко Г. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В РАВНОКАНАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ МАТРИЦЕ С УГЛОМ СТЫКА КАНАЛОВ 45°

Уже не первое десятилетие во всем мире отмечается значительный интерес к развитию технологий, направленных на получение металлов и сплавов с повышенным уровнем физико-механических свойств. Одним из перспективных способов улучшения физико-механических свойств металлических материалов является измельчение элементов зеренно-субзеренной структуры до ультрамелкозернистой (УМЗ) или наноструктуры. Добиться измельчения микроструктуры металлов и сплавов при обработке их давлением возможно путем реализации в процессе деформирования интенсивных пластических деформаций (ИПД) во всем деформируемом объеме.

Методы ИПД, в отличие от традиционных методов обработки металлов давлением, направленных преимущественно на формообразование, используют с целью глубокого изменения структуры, фазового состава и физико-механических свойств. В результате интенсивного пластического воздействия в металлических материалах на порядки возрастает протяженность границ зерен и субзерен, заметно изменяется статическая и динамическая дилатация атомов кристаллической решетки. Благодаря этому, во много раз повышаются прочностные характеристики металлов при сохранении достаточно высоких пластических свойств, выгодно изменяется также ряд физических свойств, в том числе таких, которые ранее считались нечувствительными к деформациям [1].

В настоящее время наиболее широко используемым методом ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП) [2] в матрицах различных конструкций [3–7]. Данный метод в условиях многоциклового обработки обеспечивают формирование ультрамелкозернистой структуры в заготовках с высоким коэффициентом использования металла.

Но в тоже время для большинства инструментов, позволяющих реализовывать в металле ИПД, влияние процесса деформирования проявляется наиболее эффективно тогда, когда геометрические характеристики рабочего пространства инструмента обеспечивают однородность напряженного и деформированного состояний по всему объему изделия. Так для процесса РКУП интенсивность деформирования, в основном, определяет геометрия канала. Именно от нее зависят основные параметры исследуемого процесса: напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, усилие прессования, геометрия изменения деформируемого объема. Геометрические характеристики рабочего пространства инструмента определяют форму очага деформации и оказывают заметное влияние на течение деформируемого металла. Исходя из этого, необходимо рассмотреть форму и геометрические факторы, влияющие на НДС и установить оптимальные параметры формы и геометрии канала матрицы.

Анализ структурообразования при равноканальном угловом прессовании представляется исключительно сложным с точки зрения его описания методами моделирования, поскольку механическое поведение материалов при ИПД является неочевидным многофакторным процессом. Поэтому для успешного решения поставленной задачи необходимо соединить возможности компьютерного моделирования на разных (макро-, микро-, мезо) уровнях и, основываясь на физическом понимании происходящих при ИПД процессов, описать эволюцию структурных параметров ИПД материалов в зависимости от параметров ИПД и режимов РКУП. На макроуровне возможно описание поведения материала при заданной схеме

деформации в зависимости от её параметров. На мезоуровне может быть получена информация о взаимосвязи формирующейся структуры и свойств получаемых материалов. Исследования на микроуровне позволяют понять физическую природу особенностей протекающих процессов [8].

Среди наиболее удачных модификаций инструментов для равноканального углового прессования стоит отметить процесс прессования в равноканальной ступенчатой матрице, позволяющей реализовать за один проход вдвое большую степень деформации при знакопеременном её характере [9]. Однако, при этом, закономерно растёт и усилие прессования. Снижение усилия прессования, как было уже отмечено выше, является одной из наиболее актуальных проблем всего семейства процессов основанных на РКУ прессовании. Также, это одно из существенных препятствий на пути широкого внедрения подобных процессов в промышленности. Высокое значение усилия прессования преимущественно связано с затратами энергии на высокую степень деформации на стыке каналов матрицы и на трение прессуемого материала о стенки каналов матрицы.

Снижение усилия прессования за счет уменьшения степени деформации – явно противоречит самой цели процесса, поэтому запатентовано множество способов снижения трения в каналах матрицы. Как правило, исследователи идут путем оптимизации формы канала, либо заменой трения скольжения – трением качения на различных участках матрицы.

Таким образом, наиболее логичным путем усовершенствования процесса, стоит признать путь снижения усилия прессования при сохранении высокой степени деформации за проход.

Основываясь на этих, и некоторых других соображениях, предложена конструкция равноканальной матрицы с углом стыка каналов 45° . Реализация угла стыка каналов меньше 90° в чистом виде, по известным причинам затруднительна. Однако, возможна реализация этой концепции путем разбиения очага деформации на несколько последовательно расположенных очагов так, как это показано на рис. 1.

Проведенные в работе [10] исследования напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров, проведенные на основе компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM процесса деформирования заготовок в равноканальных угловых матрицах новой конструкции, позволили сделать вывод, что 2-й вариант РКУ матрицы с углом стыка каналов 45° (рис. 1, б) является наиболее удачным. Данный вариант (вариант 2) обеспечивает более высокую степень накопленной деформации, при равномерно распределении деформации по сечению заготовки, а также вместе с вариантом 3 получение и более правильной формы переднего конца заготовки по сравнению с вариантом 1.

Для проверки эффективности разработанной технологии был проведен лабораторный эксперимент. Эксперимент проводился на заготовках из алюминиевого сплава 6060 сечением 20×20 мм² и длиной равной 60 мм. Для оценки эффективности новой матрицы для РКУП необходимо сравнить микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава до и после деформирования в предлагаемой матрице с углом стыка каналов 45° и наиболее часто применяемой равноканальной угловой матрицей с углом стыка 90° . Поэтому прессование алюминиевых заготовок осуществляли, как в обычной матрице с углом пересечения каналов 90° , так и в матрице с квазисверхмалым углом стыка каналов, в частности в РКУ матрице с углом стыка каналов 45° , изготовленной по 2-му варианту (рисунок 1, б). РКУП в обоих случаях осуществлялось по маршруту Вс с поворотом заготовки на 90° вокруг продольной оси. Трение между инструментом и заготовкой снижалось применением пальмового масла с графитом в качестве смазки. Деформирование проводилось при комнатной температуре, что также способствует получению ультрамелкозернистой структуры.

Алюминиевые сплавы традиционно делят на два класса – термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Для достижения наибольшего изменения микроструктуры и максимального повышения прочности алюминиевые сплавы целесообразно подвергать термической обработке на твердый раствор перед проведением РКУП. Кроме того, такая предварительная обработка термически упрочняемых сплавов позволяет реализовать с них после РКУП

дополнительное упрочнение при последующем старении за счет выделения упрочняющих наноразмерных фаз. Поэтому перед проведением деформирования заготовки были подвергнуты закалке при 550 °С, с выдержкой 15 минут и ускоренным охлаждением в воде. Цель закалки состоит в том, чтобы полностью перевести в твердый раствор алюминия все Mg-Si частицы.

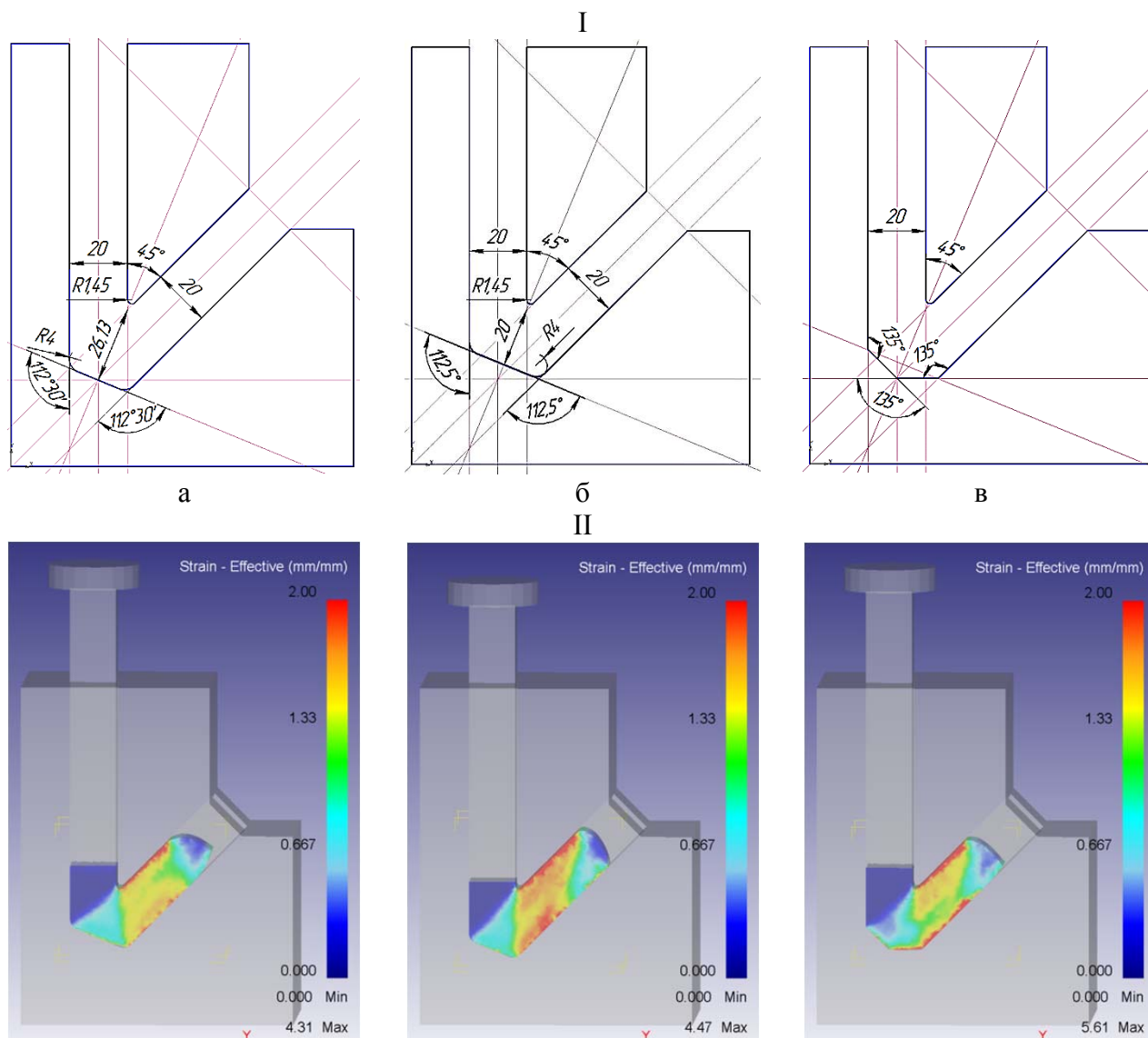


Рис. 1. Равноканальная угловая матрица новой конструкции:

I – конструкция матриц; II – распределение накопленной деформации; а – РКУ матрица с углом стыка каналов 45°, вариант 1; б – РКУ матрица с углом стыка каналов 45°, вариант 2; в – РКУ матрица с углом стыка каналов 45°, вариант 3.

Подготовку образцов для металлографического анализа осуществляли на устройстве электролитической пробоподготовки Struers. Все образцы были исследованы в средней плоскости образца, чтобы избежать влияния периферийных областей. Получаемые образцы рассматривались в двух сечениях: поперечном и продольном. Структуру и фазовый состав сплава анализировали методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии. Качественный и количественный анализ микроструктуры матрицы сплава и первичных фаз проводили с помощью оптического микроскопа LEICA, оснащенного приставкой для определения микротвердости отдельных фаз, а также программным обеспечением для определения балла зерна и количества фаз на механически полированных и протравленных реактивом Келлера шлифах.

Тонкую структуру исследовали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM2100 в диапазоне увеличений от 1000 до 50000 раз. Объекты для ПЭМ готовили струйной полировкой на приборе Tenupol-3 при температуре $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжении 20В в 20 % растворе азотной кислоты в метиловом спирте.

Для оценки механических характеристик сплава после РКУП использовали крутильно-разрывную машину М140КУ. Испытывали стандартные образцы цилиндрической формы (диаметр рабочей части 3 мм, длина – 15 мм) по ГОСТ 1497-84. Для проведения испытания на растяжение из заготовок на токарном станке изготавливали образец для растяжения III-го типа. Скорость растяжения образцов 0,5 мм/мин, что соответствует скорости деформации, равной $0,56 \times 10^{-3}\text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 приведены ПЭМ изображения структуры образцов.

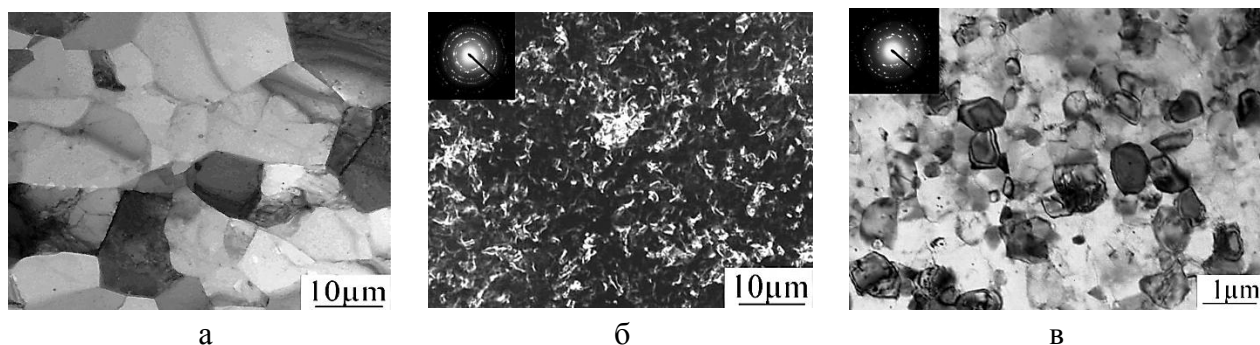


Рис. 2. Структура алюминия марки 6060:

а – исходная структура; б – РКУП с углом стыка каналов матрицы 90° ; в – РКУП с углом стыка каналов матрицы 45°

На рис. 2, а показана микроструктура сплава в исходном состоянии, после закалки при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ с охлаждением в воде. Структура представляет собой пересыщенный твердый раствор на основании алюминия и нерастворенные фазы эвтектического происхождения. Фотографии микроструктуры после шести циклов прессования, при различных условиях деформирования представлены на рис. 2, б–в.

Металлографический анализ структуры после 6 проходов РКУП в матрице с углом стыка каналов 90° показал, что в алюминии формируется ультрамелкозернистая структура со средним размером зерна 0,6–1,1 мкм (рис. 2, б), после деформирования в матрице с углом 45° была получена микроструктура, имеющая средний размер зерна 0,5 мкм (рис. 2, в). Картины электронной дифракции, представляющие собой многочисленные рефлексы, равномерно распределенные по окружности, что свидетельствует о том, что сформированные состояния относятся к структурам зеренного типа, имеющие преимущественно большеугловые разориентировки. Из рис. 2, в также видно, что после деформации в матрице с углом стыка каналов 45° структура границ зерен является более равновесной и однородной.

РКУП с углом стыка каналов 90° за 6 проходов не приводит к образованию однородной по типу структуры, в ней присутствуют дислокационные ячейки, субзерна и зерна, средний размер элементов структуры составляет 0,6–1,1 мкм, что согласуется с данными работ [11–12]. То есть 6 проходов при РКУП с традиционным углом деформирования недостаточно, чтобы получить равноосную однородную ультрамелкозернистую структуру.

Как правило, в процессе РКУП часть затрачиваемой механической энергии превращается во внутреннюю энергию деформируемой заготовки. В результате этого температура заготовки повышается. А так как алюминий обладает низкой энергией дефектов упаковки, то динамической рекристаллизации не наступает. Но уменьшение угла матрицы до квазисверхмалого приводит к увеличению усилия деформирования, в результате чего увеличиваются скорости аннигиляции дислокаций в теле зерен и число дислокаций, поглощенных стенками субзерен, уменьшается.

После одного прохода РКУП с углом стыка каналов 45° структура сплава представляла собой сильно вытянутые зерна. Но получаемые ячеистые структуры имели в основном малоугловые границы. Увеличение числа проходов до шести обеспечивает превращение субзеренных границ в большеугловые зеренные границы.

Помимо исследования изменений структуры при деформировании, были исследованы механические свойства заготовок после каждого вида деформирования при растяжении при комнатной температуре.

Измельчение размера зерен алюминиевых сплавов ведет к их повышенной прочности. Более того, введение высокой плотности дислокаций в ультрамелкозернистые сплавы при РКУП может привести к еще большему их упрочнению, но обычно при этом происходит снижение их пластичности. Материалы могут быть прочными или пластичными, но редко обладают высоким уровнем свойств одновременно. Формирование УМЗ состояния обеспечивает высокую прочность сплава за счет уменьшения размера зерна в соответствии с зависимостью Холла-Петча и образования в алюминиевой матрице дисперсных выделений упрочняющих фаз – дисперсионного твердения.

По результатам испытаний на растяжение получено, что уровень прочности заготовок, подвергнутых прессованию в матрице с углом стыка каналов 45° , значительно превосходит аналогичный для образцов, подвергнутых традиционному прессованию в матрице с углом 90° . Так значения предела прочности и текучести увеличиваются за шесть проходов для традиционного РКУП (в матрице с углом стыка 90°) с 250 до 462 МПа (абсолютный прирост значения предела прочности составляет 212 МПа) и с 206 до 420 МПа (абсолютный прирост значения предела текучести составляет 214 МПа). С применением матрицы с углом стыка каналов 45° предел прочности и текучести увеличиваются за шесть проходов с 250 до 505 МПа (абсолютный прирост значения предела прочности составляет 255 МПа) и с 206 до 447 МПа (абсолютный прирост значения предела текучести составляет 241 МПа), соответственно.

Пластические свойства алюминиевых образцов в процессе РКУП снижаются в обоих случаях. Так экспериментальные исследования изменения относительного удлинения при испытании на растяжение показали, что уровень пластических свойств алюминия после 6 проходов падает в обоих случаях практически в 2 раза.

ВЫВОДЫ

В целом проведенные исследования показали, что равноканальное угловое прессование в предложенной матрице с углом стыка каналов 45° , то есть в матрице с квазисверхмалым углом стыка каналов, обеспечивает формирование однородной субзеренной структуры и положительно влияет на механические свойства алюминиевого сплава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рааб Г. И. Перспективные методы ИПД для получения наноструктурированных металлических материалов / Г. И. Рааб, В. Г. Шибиков, А. Г. Рааб // *Materials Physics and Mechanics*. – 2016. – № 25. – С. 72–82.
2. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 272 с.
3. Valiev Ruslan Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // *Progress in Materials Science*. – 2006. – № 51. – Pp. 881–981.
4. Утяшев Ф. З. Влияние очага деформации на измельчение структуры в металлах / Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб // *Физика металлов и металловедение*. – 2007. – № 6. – С. 104–109.
5. Пат. РФ № 2181314. Устройство для обработки металлов давлением / Рааб Г. И., Кулясов Г. В., Полозовский В. А., Валиев Р.З. – № 2000115099/02 ; заявл. 09.06.2000 ; опубл. 20.04.2002, Бюл. № 11.
6. European Patent №EP1861211, B21C23/01; B21J5/00; B21C23/01; B21J5/00. Severe plastic deformation of metals / Rosochowski Andrzej. – 2007.12.05
7. Olejnik L. Methods of fabricating metals for nano-technology / L. Olejnik, A. Rosochowski // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences : Technical sciences*. – 2005. – Vol. 53, No. 4. – Pp. 413–423.
8. Смоляков А. А. Моделирование процесса получения нанокристаллической структуры в металлах с использованием равноканального углового прессования : дис. канд. техн. наук / А. А. Смоляков. – Уфа, 2007.

9. Исследование процесса деформирования заготовки равноканальной ступенчатой матрицей / Найзабеков А. Б., Ашкеев Ж. А., Лежнев С. Н., Толеуова А. Р. // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2005. – № 2. – С. 16–18.
10. Найзабеков А. Б. Конечно-элементное моделирование РКУ прессования с квазисверхмалыми углами стыка каналов / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, А. С. Арбуз // *Международный научно-технический прогресс ОМД-2014 «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии».* – Москва, 2014. – С. 206–210.
11. Sanghyun Lee, Suyong Kwon, Jong-Cheon Lee, Seoung-Won Lee. Thermophysical Properties of Aluminium 1060 Fabricated by Equal Channel Angular Pressing [J] // *International Journal of Thermophysics.* – Vol. 33, Issue 3: 540–551. (DOI: 10.1007/s10765-012-1176-2)
12. Korchef A. Microstructure investigation of equal channel angular pressed aluminium by X-ray diffraction and scanning electron microscopy [J] / A. Korchef, N. Njah, A. W. Kolsi // *Crystal Research and Technology.* – Vol. 44(1): 106-110. (DOI: 10.1002/crat.200800131).

REFERENCES

1. Raab G. I. Perspektivnye metody IPD dlja poluchenija nanostrukturirovannyh metallicheskih materialov / G. I. Raab, V. G. Shibakov, A. G. Raab // *Materials Physics and Mechanics.* – 2016. – № 25. – S. 72–82.
2. Valiev R. Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoj deformaciej / R. Z. Valiev, I. V. Aleksandrov. – M.: Logos, 2000. – 272 s.
3. Valiev Ruslan Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // *Progress in Materials Science.* – 2006. – № 51. – Pp. 881–981.
4. Utjashev F. Z. Vlijanie ochaga deformacii na izmel'chenie struktury v metallah / F. Z. Utjashev, G. I. Raab // *Fizika metallov i metallovedenie.* – 2007. – № 6. – S. 104–109.
5. Pat. RF № 2181314. Ustrojstvo dlja obrabotki metallov davleniem / Raab G. I., Kuljasov G. V., Polozovskij V. A., Valiev R. Z. – № 2000115099/02; zajavl. 09.06.2000; opubl. 20.04.2002, Bjul. № 11.
6. European Patent №EP1861211, B21C23/01; B21J5/00; B21C23/01; B21J5/00. Severe plastic deformation of metals / Rosochowski Andrzej. – 2007.12.05
7. Olejnik L. Methods of fabricating metals for nano-technology / L. Olejnik, A. Rosochowski // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical sciences.* – 2005. – Vol. 53, No. 4. – Pp. 413–423.
8. Smoljakov A. A. Modelirovanie processa poluchenija nanokristallicheskoj struktury v metallah s ispol'zovaniem ravnokanal'nogo uglovogo pressovanija: dis. kand. tehn. nauk / A. A. Smoljakov. – Ufa, 2007.
9. Issledovanie processa deformirovanija zagotovki ravnokanal'noj stupenchatoj matricej / Najzabekov A. B., Ashkeev Zh. A., Lezhnev S. N., Toleuova A. R. // *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija.* – 2005. – № 2. – S. 16–18.
10. Najzabekov A. B. Konechno-jelementnoe modelirovanie RКУ pressovanija s kvazisverhmalymi uglami styka kanalov / A. B. Najzabekov, S. N. Lezhnev, A. S. Arbuз // *Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij progress OMD-2014 «Fundamental'nye problemy. Innovacionnye materialy i tehnologii».* – Moskva, 2014. – S. 206–210.
11. Sanghyun Lee, Suyong Kwon, Jong-Cheon Lee, Seoung-Won Lee. Thermophysical Properties of Aluminium 1060 Fabricated by Equal Channel Angular Pressing [J] // *International Journal of Thermophysics.* – Vol. 33, Issue 3: 540–551. (DOI: 10.1007/s10765-012-1176-2)
12. Korchef A. Microstructure investigation of equal channel angular pressed aluminium by X-ray diffraction and scanning electron microscopy [J] / A. Korchef, N. Njah, A. W. Kolsi // *Crystal Research and Technology.* – Vol. 44(1): 106-110. (DOI: 10.1002/crat.200800131).

Лежнев С. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД РИИ;
sergey_legnev@mail.ru

Волокитина И. Е. – PhD, ст. преп. каф. ОМД КГИУ;
irinka.vav@mail.ru

Арбуз А. С. – PhD, ст. науч. сотруд. РИИ;
zubra_kz@mail.ru

Гайдаренко Г. А. – магистр каф. ОМД КГИУ.
gaidarenko_grigoriy@mail.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 11.03.2019 г.