

# **Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx – 7xxx**

## **Analysis and mathematical modeling of the process of asymmetric rolling of aluminum alloys of series 1xxx, 2xxx, 5xxx - 7xxx**

### **Бирюкова О.Д.**

Аспирант кафедры технологий обработки материалов Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова  
e-mail: fimapatisationchik@inbox.ru

### **Biryukova O.D.**

Postgraduate student, Department of Material processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University  
e-mail: fimapatisationchik@inbox.ru

### **Пустовойтов Д.О.**

Канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова

### **Pustovoitov D.O.**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University

### **Аннотация**

Рассмотрены проблемы применения алюминиевых сплавов исходя из требований современной промышленности. Сплавы алюминия сегодня широко используются в ракетно-, авиа- и автомобилестроении благодаря высокой коррозионной стойкости и свариваемости, а также повышенным прочности и пластичности, приобретаемым при криогенной обработке данного материала. Произведено моделирование процесса асимметричной аккумуляющей прокатки, показывающее возможность обработки биметаллов из разнородных сплавов алюминия. Проанализированы результаты моделирования и построены зависимости параметров деформирования от основных характеристик процесса: трения и скорости валков. Рассмотрена возможность применения криогенной обработки при данных параметрах.

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, криогенная прокатка, аккумуляющая прокатка, моделирование, накопленная деформация, алюминиевый сплав, интенсивная пластическая деформация.

### **Abstract**

The problems of the use of aluminum alloys on the assumption of the requirements of modern industry are considered. Aluminum alloys nowadays are widely used in rocket, aircraft and automotive industry due to the high corrosion resistance and weldability, as well as increased strength and ductility, acquired during cryogenic processing of this material. The simulation of the asymmetric accumulative rolling process, showing the possibility of processing bimetals from dissimilar aluminum alloys, was provided. The simulation results were analyzed and the dependencies of the defor-

mation parameters on the main characteristics of the process (friction coefficients and roll speeds) are described. The possibility of using cryogenic processing with these parameters is considered.  
**Keywords:** asymmetric rolling, cryogenic rolling, accumulative rolling, modeling, accumulated deformation, aluminum alloy, severe plastic deformation.

### Введение

Сплавы алюминия сегодня широко используются в ракето-, авиа- и автомобилестроении благодаря высокой коррозионной стойкости и свариваемости, а также повышенным прочностными и пластичности, приобретаемым при криогенной обработке данного материала. Соответственно, первостепенную важность играет получение оптимальных свойств при обработке алюминиевых сплавов в криогенном состоянии. Кроме того, среди большого количества работ по исследованию свойств черных и цветных металлов, алюминиевые сплавы занимают значительное место благодаря высокому сочетанию механических свойств и малой массы конструкций.

Как правило, при снижении температуры обработки, те или иные материалы охрупчиваются, теряют пластичность и впоследствии разрушаются из-за высокого уровня локализованных напряжений. В ряде случаев некоторые цветные металлы, в частности алюминиевые сплавы, способны сохранять пластичность до очень низких температур (-270 °С). Например, сплавы марок Al5083 и Al5052 имеют достаточную вязкость для обработки при температуре -253 °С, а Al5086, Al5154 и Al5456 показывают определенную степень охрупчивания уже при -73 и -196 °С. Для сплава Al2024 характерно повышение предела прочности до 120%, непрерывное увеличение предела пропорциональности и модуля упругости, улучшение свариваемости на 30%. Al6061 имеет хороший потенциал применения при низких температурах: сохраняется высокое значение вязкости, но предел текучести и прочность до температур -253 °С показывают более низкий уровень по сравнению с другими высокопрочными алюминиевыми сплавами. Сплавы серии 7000 при отрицательных температурах имеют предел текучести и пропорциональности на 40% выше, чем при комнатных. Необходимо иметь в виду, что большое количество легирующих элементов в данных металлах может привести к низкотемпературному охрупчиванию, особенно это заметно в сплавах алюминия Al7079, Al7178 и Al7275 [1-3].

### Метод исследования и используемые материалы

Наибольший интерес для данной работы представляют собой алюминиевые сплавы марок Al1070, Al2024, Al5083, Al6061 и Al7075, химический состав которых представлен в табл. 1 [1, 4]. Необходимо отметить, что сплавы алюминия первой серии желательно обрабатывать только совместно с более прочным материалом. К примеру, это может быть сплав алюминия 5000, 6000 или 7000 серий, в этом случае получится биметалл Al5083/Al1070, Al6061/Al1070 или Al7075/Al1070. Данная необходимость объясняется тем, что отрицательные явления механических свойств можно предотвратить использованием многослойного композита из различных по направлению сплавов.

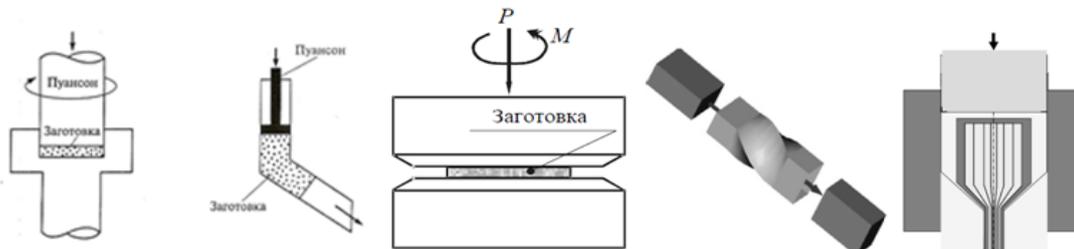
Таблица 1

**Химический состав алюминиевых сплавы марок Al1070, Al2024, Al5083, Al6061 и Al7075**

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al1070	0.15	0.16	0.01	0.03	0.02	-	0.04	0.01	99.7
Al2024	0.422	0.178	0.02	0.019	0.473	0.001	0.25	0.15	98.487
Al5083	0.091	0.285	0.027	0.682	4.479	0.104	0.014	0.007	94.282
Al6061	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	96.0
Al7075	0.4	0.5	2.0	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	87.32

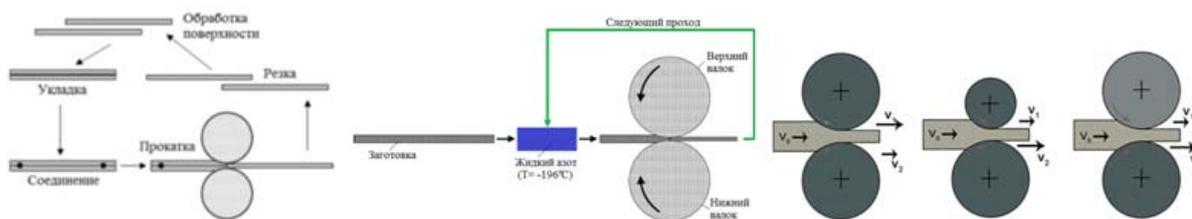
Создание подобных композитов стало возможным благодаря процессам интенсивной пластической деформации, которые являются одними из самых современных, эффективных и экономически обоснованных способов получения высоких значений механических свойств

металлов и сплавов. Методы интенсивной пластической деформации направлены на получение определенной структуры материала и зависящих от нее физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств. Основными методами интенсивной пластической деформации являются равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением, винтовая экструзия, всесторонняя изотермическая ковка и т.д. (рис. 1). Данные процессы, несмотря на возможность получения ультрамелкозернистой структуры, не являются технологически выгодными: нельзя получать длинномерные изделия, производительность мала.



**Рис. 1.** Методы интенсивной пластической деформации

Отрицательные стороны подобных процессов можно избежать применением асимметричной, аккумулялирующей и криогенной прокатки, являющихся одними из современных методов интенсивной пластической деформации (рис. 2). Основное преимущество данных процессов – получение длинномерных изделий с ультрамелкозернистой структурой [5].



**Рис. 2.** Процессы аккумулялирующей, криогенной и асимметричной прокатки

Особое внимание при моделировании процесса было уделено аккумулялирующей прокатке, технология которой состоит в многократном повторении цикла обработки поверхности металла – укладки одинаковых по форме и размеру листов друг на друга – соединении этих листов (как правило, сваркой взрывом) – прокатки – резки на равные части – укладки – и т.д. [6].

Для оценки деформированного состояния, условий прямолинейного выхода металла из валков было произведено моделирование процессов симметричной и асимметричной аккумулялирующей прокатки в программном комплексе Deform 2D. В качестве материала использовались биметаллы Al5083/Al2024, Al6061/Al2024, Al7075/Al2024, Al5083/Al1070, Al6061/Al1070. Все основные параметры процесса представлены в табл. 2.

Таблица 2

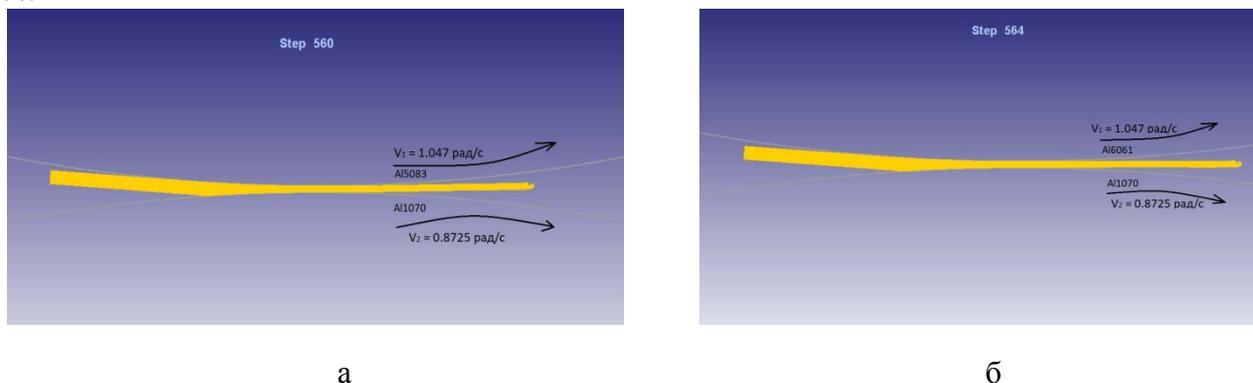
**Параметры процессов симметричной и асимметричной прокатки алюминиевых биметаллов**

Параметр	Значение
используемые сплавы	Al1070, Al2024, Al5083, Al6061, Al7075
толщина заготовки	2 мм
обжатие	50 %
коэффициент трения	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
скорость валков при симметричной прокатке	1,047 рад/с
рассогласование скоростей валков	10 %; 20 %; 30 %; 40 %; 50 %

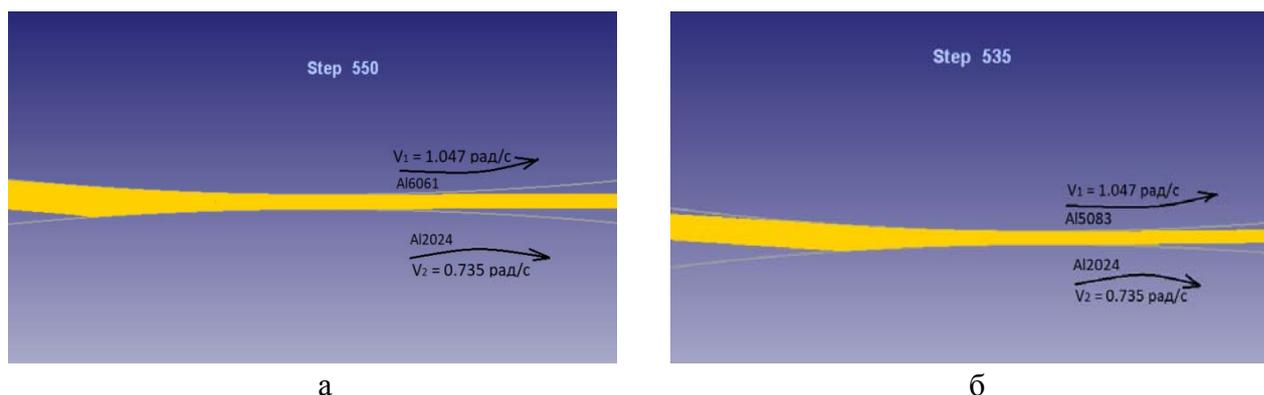
#### Полученные результаты моделирования

Моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых биметаллов с рассогласованием скоростей валков показало следующие результаты: при увеличении скоростной

асимметрии от 10 до 50% изменяется прямолинейность выхода металла из очага деформации. Наблюдается значительный изгиб переднего и заднего концов полосы практически во всех случаях моделирования. Влияние на изгиб полосы оказали, в первую очередь, скорости валков и значения коэффициентов трения. Наиболее благоприятным случаем выступают эксперименты при коэффициенте трения  $f = 0,3$ . Рассогласование скоростей валков зависело от вида алюминиевого сплава: чем прочнее была марка нижнего слоя, тем большая разница скоростей требовалась для прямолинейного выхода полосы, что подтверждается рис. 3 (а и б) и 4 (а и б). В первом случае рассогласование скоростей валков составило 20%, во втором – 40%.

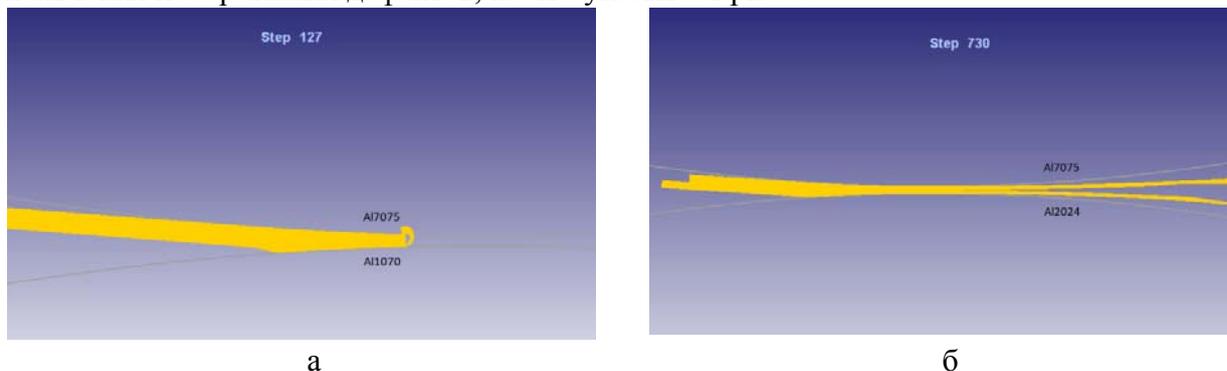


**Рис. 3.** Характер течения металла при асимметричной прокатке биметаллов Al5083/Al1070 (а) и Al6061/Al1070 (б) при коэффициенте трения  $f = 0,3$



**Рис. 4.** Характер течения металла при асимметричной прокатке биметаллов Al6061/Al2024 (а) и Al5083/Al2024 (б) при коэффициенте трения  $f = 0,3$

Очевидно, что металл обжимается неравномерно, а выравнивание полосы происходит в том случае, если продольная скорость верхней и нижней поверхности полосы будут неодинаковы. Однако в двух случаях (асимметричный процесс прокатки биметаллов Al7075/Al1070 и Al7075/Al2024) рекомендуется не проводить эксперименты из-за возможности появления необратимых дефектов, на что указывает рис. 5.



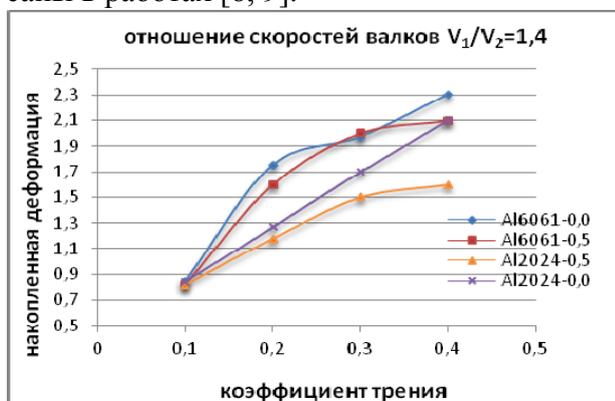
**Рис. 5.** Характер течения металла при асимметричной прокатке биметаллов Al7075/Al1070 (а) и Al7075/Al2024 (б)

Подтверждение возникновения дефекта «крокодил» (рис. 6) при обработке алюминиевых сплавов с различной прочностью было найдено в работе Ahmed Ismail Zaky Farahat [7]. Также в описании данного дефекта указано, что частой причиной возникновения является неверно подобранные обжатия и температурный режим прокатки.

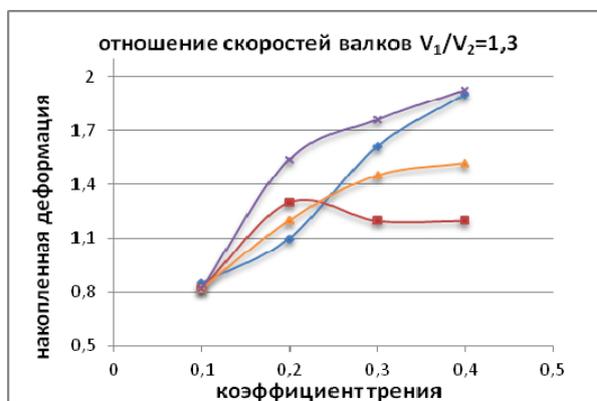


**Рис. 6.** Дефект «крокодил»

Исходя из полученных результатов, были построены зависимости накопленной деформации от коэффициентов трения при постоянном отношении скоростей валков для Al6063/Al1070 и Al6063/Al2024, представленные на рис. 7 и 8. Предыдущие результаты описаны в работах [8, 9].

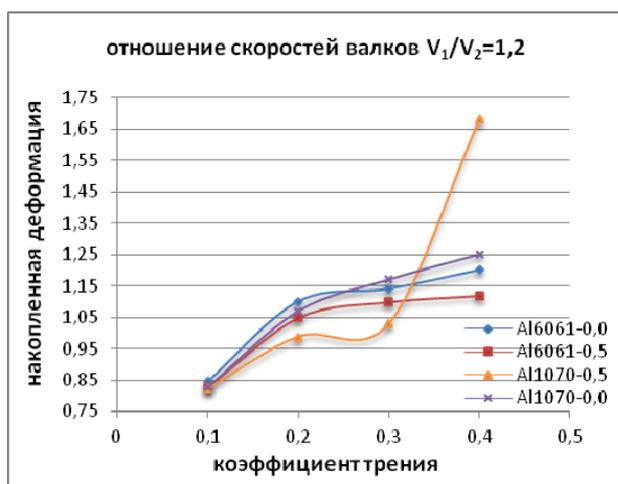


а

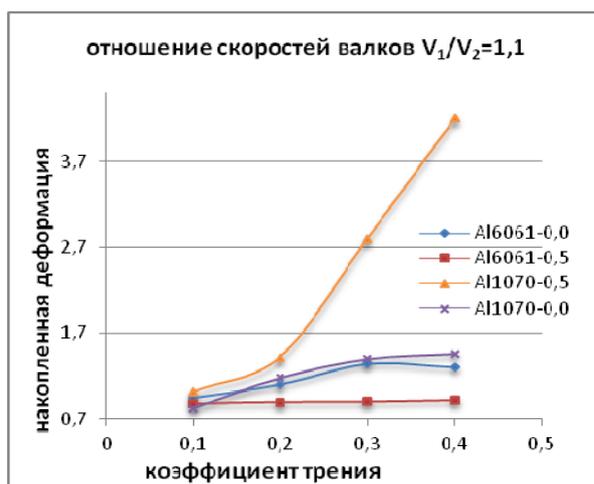


б

**Рис. 7.** Зависимости накопленной деформации от коэффициента трения при отношении скоростей валков  $V_1/V_2 = 1,4$  (а) и  $V_1/V_2 = 1,3$  (б) для биметалла Al6063/Al2024



а



б

**Рис. 8.** Зависимости накопленной деформации от коэффициента трения при отношении скоростей валков  $V_1/V_2 = 1,2$  (а) и  $V_1/V_2 = 1,1$  (б) для биметалла Al6063/Al1070

Известно, что в очаге деформации во время пластического деформирования металла происходит сильный его разогрев. Повышение температуры зависит как от свойств конкретного

металла, так и от параметров процесса. Определить термодинамический разогрев можно аналитически исходя из законов термодинамики [10]:

$$\Delta t_p = \frac{\eta T \Lambda}{c \rho}, \quad (1)$$

где  $T$  – интенсивность касательных напряжений;

$\Lambda$  – степень деформаций сдвига;

$\eta$  – доля тепла, остающаяся в теле;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\rho$  – плотность.

Для исследуемых материалов повышение температуры может составлять от 40 до 600 °С в зависимости от марки алюминиевого сплава, величины обжатия и скорости деформирования. Например, деформационный разогрев при асимметричной тонколистовой прокатке сплава Al5083 с обжатием 50% в среднем составляет 260 °С [5]. Такой эффект заметно влияет на коэффициент трения и напряженное состояние сплава.

Для повышения механических, технологических свойств, а также для исключения появления термических дефектов, получения равномерной кристаллической структуры, снижения усилий процесса стало возможным использовать процесс криогенной прокатки. Было выявлено, что наиболее благоприятно помещать заготовку перед прокаткой в жидкий азот. По данным [11], для получения наилучшего сочетания механических свойств, алюминиевые сплавы серии 5000 необходимо помещать в жидкий азот на 60 мин. Однако произвести процесс аккумулярующей криогенной прокатки будет достаточно проблематично из-за разницы времени погружения слоев металлов в азот для достижения одинаково высоких значений механических свойств.

Кроме того, следует учитывать материальный ущерб, который наносится при испытании натуральных конструкций. В этом случае появляется необходимость создания испытательных установок, которые могли бы наиболее точно воспроизвести условия работы конструкции.

### **Выводы**

В исследовании рассмотрен теоретический аспект использования интенсивной пластической деформации для достижения ультрамелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах серий 1000, 2000, 5000, 6000 и 7000; представлены результаты математического моделирования процесса асимметричной аккумулярующей прокатки биметаллов Al5083/Al1070, Al5083/Al2024, Al6061/Al1070, Al6061/Al2024, Al7075/Al1070 и Al7075/Al2024; проанализирована возможность использования криогенной обработки данных сплавов.

Выявлено, что коэффициент трения, равный 0,3, является наиболее благоприятным при проблеме прямолинейного выхода полосы из валков вне зависимости от вида прокатываемых алюминиевых сплавов. При повышении прочностных свойств полосы, требуется увеличение рассогласования скоростей валков (при обработке сплавов Al5083/Al1070 и Al6061/Al1070 рассогласование составило 20%, а для прокатки Al5083/Al2024 и Al6061/Al2024 необходимо рассогласование в 40%). Зависимости накопленной деформации от коэффициентов трения при постоянном отношении скоростей валков для серий 1000, 2000 и 6000 показывают идентичные результаты работам [8, 9]. Для проведения натуральных экспериментов необходимо учитывать термодинамический разогрев металла при деформации. Проведение процесса аккумулярующей криогенной прокатки представляется сложной задачей, так как существует разница во времени погружения различных сплавов алюминия в азот для достижения одинаково высоких значений механических свойств.

### **Благодарность**

Исследования проведены в рамках выполнения работ по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (соглашение №075-02-2018-347 от 16 ноября 2018 г.).

## Литература

1. Zebing Xu Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature / Zebing Xu, Hans J. Roven, Zhihong Jia. – Materials Science and Engineering Vol. 648. – 2015. P. 350–358.
2. Nageswara rao P., Kaurwar A., Singh D. Enhancement in Strength and Ductility of Al-Mg-Si alloy by Cryorolling followed by Warm rolling // Advance Publication by J-STAGE Mechanical Engineering Journal. 2014, Vol. 75. No. 1. p. 123-128.
3. *Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Свердлик М.К.* Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. – 2015. – №4. – С. 81–87.
4. Alvandi H. Microstructural and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Structured 7075 Aluminum Alloy by Accumulative Roll-Bonding Process/ H. Alvandia, K. Farmanesha. – 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15. Procedia Materials Science Vol.11. – 2015. – p. 17 – 23.
5. *Песин А.М.* Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик, МОиНРФ ФГБОУ ВО МГТУ им.Г.И. Носова. – 2017. – 152 с.
6. Tsuji N. Accumulative roll-bonding and other new techniques to produce bulk ultrafine-grained materials/Tsuji N., Saito Y., Lee S.-H., Minamino Y. – Weinheim, 2003. – 343p.
7. Farahat A. I. Accumulative Roll Bonding of 1050 Aluminium Alloy/ Ahmed Ismail Zaky Farahat. – World of Metallurgy – ERZMETALL 68 No. 1. – 2015. P. 5-12.
8. Pesin A.M. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling / A.M. Pesin, D.O. Pustovoitov, O.D. Biryukova – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 447, 2018. p/ 1 – 4.
9. *Песин А.М.* Влияние скоростной асимметрии на деформационное состояние в алюминиевом биметалле 5083/1070 при пакетной прокатке/ А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова – Обработка сплошных и слоистых материалов №1. – Магнитогорск 2018. – С. 44–50.
10. *Орлов Г.А.* Учет деформационного разогрева при холодной прокатке/ Г.А. Орлов, А.Г. Орлов – Известия ВУЗов, Чёрная металлургия № 9, ТОМ 57. – 2014. – С. 64–66.
11. Anas N. M. Effect of immersion duration in liquid nitrogen for cryorolled A5052 aluminium sheet alloy/ N. M. Anas, W. L. Quah, H. Zuhailawati, A. S. Anasyida – Procedia Chemistry 19 . – 2016. – p. 241 – 246.