Исследование структуры и механических свойств металлоизделий из сплава АД0, полученных с помощью новой технологии непрерывного литья

А. М. Сергеева, Н. С. Ловизин, А. А. Соснин, В. И. Одиноков

Рассмотрен новый способ получения металлоизделий с повышенными механическими характеристиками. Исследованы микроструктура и механические свойства полученного металлоизделия из сплава АД0. Новый способ непрерывного литья разработан с целью получения объемных металлоизделий определенной формы обладающих сочетанием улучшенных механических и эксплуатационных свойств. В основу разработки указанного способа положены принципы непрерывного литья металлов и полного совмещения нескольких технологических процессов. На примере заготовки из сплава АД0 показано влияние инновационного способа непрерывного литья на структурирование объемных металлоизделий и улучшение их механических свойств, в результате реализации процесса.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микроструктура, механические свойства, структурное упрочнение, кристаллизация, непрерывное литье.

Ведение

Современные материалы, используемые в аэрокосмической технике, машиностроении и других отраслях промышленности должны быть технологичными, обладать высокими техническими характеристиками и ценовой доступностью. Наиболее важные требования, предъявляемые к конструкционным материалам современных летательных аппаратов, следующие: максимальная прочность, максимальный ресурс работы, высокая надежность, минимальный вес. История развития самолетостроения отражает этапы развития отечественных сплавов от сплава Д16, являющимся основным конструкционным материалом в самолетах типа Су-7, сплавов В95, Д19, ВТ20, От45-1, используемых в самолетах Су-27 и его модификациях, до новых сплавов ВТ23, 1151, В-1461, ВНС-65 — материалов, заложенных в конструкцию опытных изделий самолета Т-50. Эволюция алюминиевых сплавов включает в себя путь от традиционных для авиации прошлых лет сплавов группы Al – Cu до их высокопрочных современников — Al – Li сплавов с пониженной плотностью [1].

Современные методы упрочнения металлоизделий основаны на создании такого структурного состояния, при котором обеспечивается максимально возможная задержка дислокаций. К таким методам можно отнести легирование, упрочнение интенсивной пластической деформацией, термическое упрочнение, термомеханическое и химико-термическое упрочнения. Упрочнение материалов основано, как правило, либо на изменении химического состава сплава, либо на последующей механической, термической и т.д. обработке полученных из сплава металлоизделий [2]. Разработка новых энергоэффективных технологий получения металлоизделий с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик является важной и сложной междисциплинарной задачей.

Цель данной работы — исследование влияния сложного технологического процесса непрерывного литья металлов в кристаллизатор переменного сечения с подвижными стенками на механические свойства и структуру получаемых металлоизделий из сплава АД0.

Материалы и методы исследования

Исследуемые металлоизделия выполнены из сплава АД0. Химический состав сплава определен с помощью спектрометра энергодисперсионного рент-

геновского флуоресцентного EDX-8000 (Shimadzu, Япония).

Устройство, позволяющее реализовать процесс литья в кристаллизатор переменного сечения с подвижными стенками, разработано в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН [3] и относится к устройствам непрерывного литья вертикального типа, реализующее идею полного совмещения процессов кристаллизации жидкого металла и его деформирования в заданный профиль. Устройство представляет собой кристаллизатор с подвижными стенками, которые осуществляют отвод тепла из зоны кристаллизации, подачу металла в зону деформации, обжатие металла в заданный профиль, калибровку и выдачу профиля. Схема устройства представлена на рис. 1. Две противоположные стенки кристаллизатора, являющиеся торцевыми поверхностями подвижных суппортов (*1*) с закрепленными на них элементами системы охлаждения и профилирования, которые на рис. 1 не отображены, имеют участки с различными углами наклона и делят объем кристаллизатора на условные зоны кристаллизации, обжатия и калибровки. Суппорта синхронно приводятся в движение с помощью эксцентриковых втулок приводных валов (*2*). Противоположное направление вращения валов обеспечивает одновременное сближение или удаление рабочих поверхностей суппортов от оси установки, поэтому при вращении приводных валов происходят циклический захват, обжатие и продвижение вдоль оси установки затвердевающего металла. Величина разового обжатия в сечении рабочего объема кристаллизатора, проходящего по осям приводных валов, равна $4e_1$ (e_1 — эксцентриситет втулки суппорта приводного вала). Две другие стенки кристаллизатора образованы рабочими поверхностями боковых стенок (*3*), которые также с помощью эксцентриковых втулок совершают прямолинейное возвратно-поступательное движение с амплитудой e_2 (e_2 — эксцентриситет втулки боковой стенки) синхронно с движением суппортов. Ориентация эксцентриситетов втулок суппортов и боковых стенок обеспечивает подачу металла на выход при расхождении рабочих поверхностей суппортов на величину $2e_1$ и проскальзывание боковых стенок в начальное положение при сближении суппортов. Неподвижные опорные плиты через плоские подшипники качения нажимными винтами прижимают стенки к боковым стенкам суппорта, обеспечивая герметичность стыков между стенками кристаллизатора при действии распорных усилий деформируемого металла. Стойки станины крепятся к фундаменту анкерными болтами и жестко фиксируются относительно друг друга стяжками (на рисунке не отображены) или боковыми стенками станины. В данном устройстве реализован одноручьевой вертикальный выход профиля под установку. Каждый суппорт через подшипники качения и эксцентриковые втулки соединен с одним приводным и одним холостым валами, оси которых перпендикулярны боковым поверхностям суппорта. При этом ось гнезда суппорта для приводного (нижнего) вала при его вращении движется по окружности с радиусом равном e_1, а ось гнезда верхнего вала, сохраняя условия неразрывности тела суппорта, по дуге окружности с радиусом равном e_2 и центральным углом $\beta < \pi$. Скорости вращения обоих приводных валов равны по величине и противонаправлены, что обеспечивается шестеренной клетью, расположенной между двигателем и установкой.

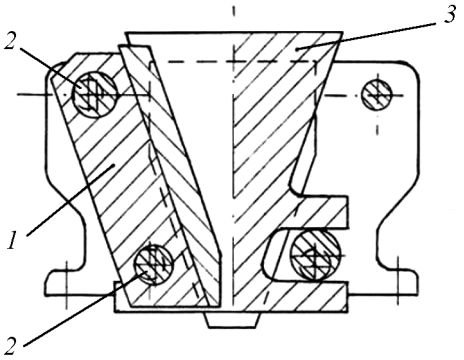


Рис. 1. Схема устройства для кристаллизации и деформации металла.

Кристаллизатор устройства, изготовлен из стали 45 и оснащен водяной системой охлаждения, причем перед проведением разливки устанавливается требуемая температура подачи воды (при проведении данного эксперимента температура подачи воды составляла 70 °С) и давление воды, подаваемой в систему охлаждения (0,392 МПа при проведении эксперимента).

Подготовку расплава проводили с использованием индукционной плавильной установки УИП-100-2.4-0.6х2Г. Для рафинирования алюминиевого сплава применяли гексахлорэтан. Сплав АД0 разогревали в печи до температуры 740 °С, после переливали в промежуточный ковш, где расплав отстаивался и остывал до температуры 710 °С. После отстаивания всплывшие капли шлака удаляли с поверхности расплава. Температуру расплава измеряли термопарами градуировки ХА(К) по ГОСТ Р8.585-2001 [4] с диаметром проволоки 0,5 мм. Показания термопар фиксировали с помощью многоканального измерителя температуры марки

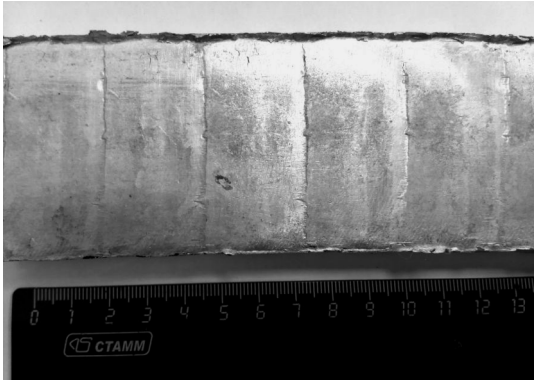


Рис. 2. Образец металлоизделия из сплава АД0.

"Термодат-29М1" (ТУ 4218-004-12023213-2009, государственный реестр средств измерений РФ № 17602-04). В данном устройстве реализуется процесс кристаллизации одновременно по всему объему заготовки, поэтому чтобы исключить захолаживание расплава в кристаллизаторе температура заливаемого расплава в кристаллизатор берется выше чем при обычном процессе литья АД0 (выше на 10 – 20 °С). Из промежуточного ковша расплав при температуре от 680 до 700 °С заливали в устройство. Увеличение температуры заливаемого расплава более чем на 20 °С нецелесообразно, так как это может способствовать образованию горячих трещин в металлоизделии и снижению механических характеристик полуфабриката.

Для предупреждения сквозного протекания расплава, в устройстве в качестве затравки использовали асбестовую ленту. Установку включали с пульта управления не одновременно с началом заливки расплава, а с запаздыванием от 2 до 5 с. В процессе работы устройства на кристаллизующийся расплав АД0 оказывается воздействие за счет работы подвижных стенок кристаллизатора, в котором происходит не только кристаллизация расплава, но и его обжатие и формообразование в заданный профиль. Длина получаемого металлоизделия может быть ограничена только расстоянием от устройства до дна колодца расположенного под устройством, в который осуществляется выход заготовки. Вид полученного металлоизделия представлен на рис. 2.

Наиболее простой и доступный способ определения прочности и пластичности материала — проведение исследований на растяжение в соответствие с ГОСТ 1497-84 [5]. Для механических исследований были взяты три группы образцов. Образцы 1 – 6, взятые в продольном направлении по толщине металлоизделия в форме пластины имели следующие геометрические размеры рабочей области (толщина × длина × ширина) — 3,00 мм × 32,42 мм × 9,00 мм. Образцы 7 – 9, взятые в поперечном направлении по толщине металлоизделия в форме пластины — 3,00 мм × 29,42 мм × 9,00 мм. Образцы 10 – 12, взятые в продольном направлении по ширине металлоизделия в форме пластины — 3,00 мм × 31,00 мм × 9,00 мм.

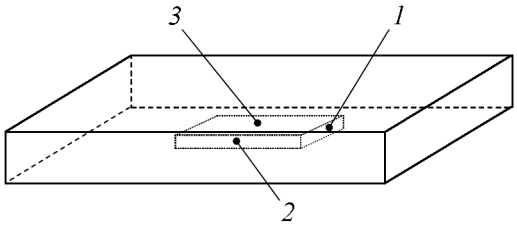


Рис. 3. Схема расположения областей *1 – 3* металлоизделия для исследования микроструктуры.

Исследования на растяжение проводили с использованием напольной универсальной испытательной машины для определения механических характеристик AG-250kNX (Shimadzu, Япония). Скорость растяжения образцов устанавливали 0,01 мм/с, поэтому можно считать, что растяжение было квазистатическим, испытания проводили при комнатной температуре 20 °С.

Для анализа микроструктуры полученного металлоизделия микрошлифы подготавливали в соответствии с ГОСТ 21073.0-75 [6] из образцов, взятых из областей заготовки указанных на рис. 3. Выбор состава реактива и способа травления для выявления границ зерен в металлоизделии осуществляли на основании рекомендаций приложения 3 ГОСТ 21073.0-75: реактив — HNO_3, способ травления — погружение в раствор с последующим промыванием под струей воды и сушкой фильтровальной бумагой. Исследование микроструктур проводили с использованием микроскопа оптического электронного сканирующего EVO MA 10 (Karl Zeiss, Германия).

Результаты и их обсуждения

В табл. 1 приведен химический состав образцов 1 – 6.

Распределение примесей по объему металлоизделия неодинаково. Из табл. 1 видно, что по краям металлоизделия (обр. 1, 6) содержится больше примесей, чем в середине (обр. 2 – 5). В середине металлоизделие не менее чем на 99,9 % состоит из чистого алюминия.

Временное сопротивление разрыву (предел прочности, $\sigma_в$) алюминия высокой чистоты (99,998 %) составляет 40 МПа, технического алюминия чистотой (99,7 %) — от 70 до 80 МПа [7].

Таблица 1

Химический состав образцов 1 – 6

№ образца	Химический состав, масс. %			
	Al	Fe	Si	Примеси всего
1	97,712	0,138	1,971	0,179
2	99,907	0,037	0,000	0,056
3	99,915	0,034	0,000	0,051
4	99,917	0,033	0,000	0,050
5	99,901	0,040	0,000	0,059
6	98,298	0,119	1,455	0,128

Таблица 2

Механические свойства полученных металлоизделий

№ образца	Направление вырезки	Механические свойства		
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
1	продольное (по толщине)	145,67	76,94	22
2		129,99	68,46	29
3		121,98	64,47	31
4		126,70	66,33	30
5		131,61	65,68	26
6		152,73	71,61	21
7	поперечное (по толщине)	107,59	60,58	16
8		110,01	62,56	18
9		108,42	59,45	15
10	продольное (по ширине)	115,35	74,88	21
11		116,81	77,92	18
12		116,27	76,84	19

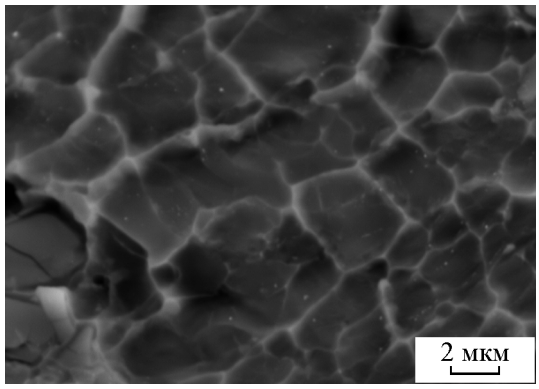
$\sigma_в$ — предел прочности, МПа; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести, МПа; δ — относительное удлинение, %.

Механические свойства алюминиевых сплавов мароки АД0 в традиционных состояниях (отожженное, нагартованое, горячекатаное) [7] составляют соответственно: $\sigma_в$ — 60, 130 и 70 МПа, относительное удлинение при разрыве δ — 28 %, 5 % и 15 %.

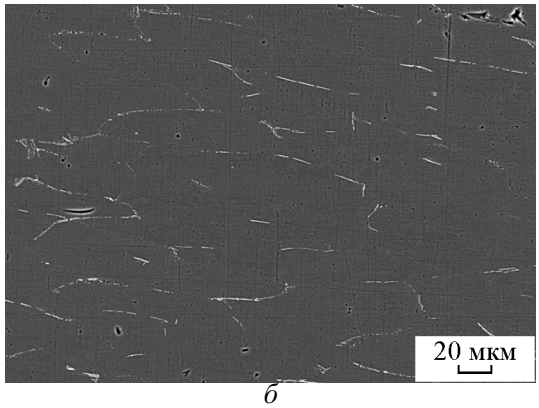
В табл. 2 приведены механические свойства образцов взятых из исследуемого металлоизделия. Анализируя полученные результаты видно, что по краям металлоизделие (образцы 1, 6) имеет $\sigma_в$ 145 – 153 МПа, $\sigma_{0,2}$ — 71 – 77 МПа и δ — 21 – 22 %. Механические характеристики осевой части заготовки соответствуют свойствам образцов 3, 4. Центральная часть металлоипродукта имеет $\sigma_в$ — 121 – 125 МПа, $\sigma_{0,2}$ — 64 – 66 МПа, δ — 30 – 31 %. Краевой эффект полученного металлоизделия выражается в повышение прочности по краям заготовки, и в снижении пластичности в данной области.

На рис. 4 приведены микроструктуры поверхностей *1 – 3*, указанных на рис. 3.

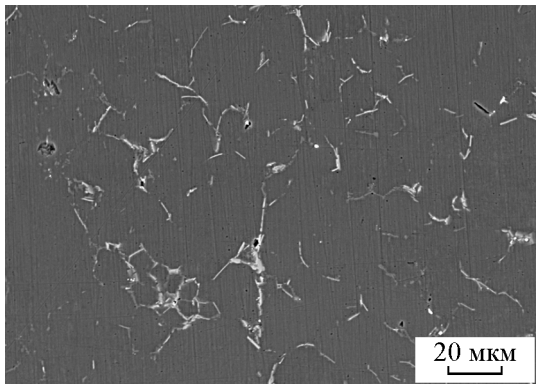
В процессе осуществления рассматриваемого технологического процесса в металлоизделии формируется четкая субзеренная структура со средним размером субзерен от 1 до 3 мкм, что четко выражено на поверхности 1. На поверхностях 2, 3



а



б



в

Рис. 4. Микроструктуры металлоизделия: *а – в* — поверхности 1 – 3, соответственно.

значительно сложнее увидеть субзеренную структуру из-за тонких границ субзерен, но анализируя рис. 4*б*, 4*в* можно сделать вывод, что дислокации в виде стенок более плотно расположены друг к другу в плоскости 2, и более свободно разориентированы в плоскости 3. Дислокации располагаются в виде стенок и сеток, образующих границы субзерен. Ликвация по объему металлоизделия незначительна. В полученных металлоизделиях оксидные и шлаковые включения обнаруживаются не по всему объему заготовки, а сосредоточенны в областях расположен-

ных ближе к поверхности. Немаловажным является тот факт, что по всему объему заготовки отсутствуют усадочные и газовые поры.

Формирующаяся в металлоизделиях структура, в результате осуществления новой технологии непрерывного литья, обеспечивает повышение прочностных свойств с одновременным ростом пластических характеристик заготовок из сплава АД0. Повышение предела прочности на разрыв и предела текучести при одновременном повышении пластичности свойственно при проявлении структурного упрочнения [7 – 9]. С учетом того, что в работе исследуется алюминий технической чистоты, влияние примесей на процесс формирование структуры сведен к минимуму, то можно с уверенностью утверждать, формирование субзеренной структуры обеспечивается только за счет реализации технологического процесса и приводит к повышению механических характеристик получаемых металлоизделий.

Выводы

1. Металлоизделия, полученные путем литья в кристаллизатор переменного сечения с подвижными стенками, имеют структуру с размерами зерен от 1 до 3 мкм.

2. Металлоизделия, полученные в результате реализации нового способа непрерывного литья, имеют улучшенные механические характеристики по сравнению с традиционными состояниями (отожженное, нагартованое, горячекатаное). У исследованных металлоизделий отмечается одновременное повышение прочностных характеристик и пластичности.

3. Повышение уровня механических свойств наиболее выражено в направлении выхода готового металлоизделия из кристаллизатора.

Литература

1. Елагин В.И., Захаров В.В. Современные Al-Li сплавы и перспективы их развития. Металловедение и термическая обработка металлов, 2013, № 4(694), с. 17 – 23.
2. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник. М.: Металлургия. 1983, 280 с.
3. Одиноков В.И. Устройство для непрерывного литья заготовок. Патент РФ № 2041011. Опубл.Бюл. №22 09.08.1995. Заявка №92007791.
4. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования: ГОСТ Р 8.585–2001. Введ. 2001-21-11. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002, 84 с.
5. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497–84. Введ. 1986-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2008, 24с.
6. Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования: ГОСТ 21073.0-75. Введ. 1976-07-01. М.: Издательство стандартов, 1976, 9 с.
7. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 1999, 414 с.
8. Добаткин В.И. Свойства конструкционных алюминиевых сплавов в рекристаллизованном и полигонизованном состояниях. Известия АН СССР. Металлы, 1982, № 2, с. 76 – 81.
9. Горелик С.С., Добаткин С.В., Копуткина Л.М. Под. ред. проф. С.С. Горелика. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005, 432 с.

References

1. Elagin V.I., Zakharov V.V. Sovremennye Al-Li splavy i perspektivy ih razvitiya (Modern Al – Li alloys and prospects of their development). Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal science and heat treatment), 2013, no. 4(694), pp. 17 – 23.
2. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buynov N.N. et al. *Metallovedeniye alyuminiya i ego splavov: Spravochnik* [Metal science: Handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 280 p.
3. Odinokov V.I. *Ustroystvo dlya nepreryvnogo litya zagotovok* [Equipment for continuous article casting]. Patent RF 2041011, Publ. 09.08.1995.
4. *Termopary. Nominalnye staticheskiye kharakteristiki preobrazovaniya* [Thermocouples. Nominal static parameters of transformation]. GOST R8.585–2001, 2001-21-11, 2002, 84 p.
5. *Metally. Metody ispytany na rastyazheniye* [Metals. Methods of tension testing]. GOST 1497–84, 1986-01-01, 2008, 24 p.
6. *Metally tsvetnye. Opredeleniye velichiny zerna. Obshchiye trebovaniya* [Non-ferrous metals. Determination of grains size]. GOST 21073.0-75, 1976-07-01, 1976, 9 p.
7. Kolachev B.A., Yelagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metal science and thermal treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 1999, 414 p.
8. Dobatkin V.I. Svoystva konstruktsionnykh alyuminiyevykh splavov v rekristallizovannom i poligonizovannom sostoyaniyakh [Properties of structural aluminum alloys in recrystallization and polyhonization state]. *Izvestiya AN SSSR. Metally — Russian metallurgy*, 1982, no. 2, pp. 76 – 81.
9. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Koputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2005, 432 p.

Статья поступила в редакцию 10.09.2015 г.

Сергеева Анастасия Михайловна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, ул. Металлургов, 1), кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, специалист в области физических процессов обработки давлением и разработки новых металлических материалов; ООО "Институт научно-технических инноваций" (участник проекта Сколково), директор. E-mail: serg-nasty@mail.ru.*

Ловизин Николай Сергеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, ул. Металлургов, 1), кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, специалист в области механики твердого тела. E-mail: iamusver@mail.ru.*

Соснин Александр Александрович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, ул. Металлургов, 1), кандидат технических наук, научный сотрудник, специалист в области обработки металлов давлением. E-mail: sosnin@imim.ru.*

Одиноков Валерий Иванович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, ул. Металлургов, 1), доктор технических наук, главный научный сотрудник, специалист в области механики технолгических процессов. E-mail: odinokov1939@mail.ru.*

Analysis of structure and mechanical properties of metalware produced by continuous-casting technology

A. M. Sergeeva, N. S. Lovizin, A. A. Sosnin, V. I. Odinokov

A new method of producing metal were with enhanced mechanical properties had been considered. The microstructure and mechanical properties of the metal alloy AD0 were investigated. The new continuous casting method is designed to obtain a certain volumetric of metal ware form having a combination of improved mechanical and performance properties. The basis for the development of this method on the principles of continuous casting of metals, and the full combination of several processes. For example, the work piece of alloy AD0 shows the effect of the innovation process for the continuous casting of metal on the structuring of volume and improvement in their mechanical properties, as a result of the process.

Keywords*:* aluminum alloys, microstructure, mechanical properties, structural hardening, crystallization, continuous casting.

Sergeyeva Anastasia *— Institute of machinery and metallurgy of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur, Russia 681005, Metallurgov st., 1), PhD (Phys-Math), deputy director for scientific work, specialist in physical processes of metal forming and development of new metallic materials; Institute of Scientific and Technical Innovation (Resident Skolkovo), Director. E-mail: serg-nasty@mail.ru.*

Lovizin Nikolay *— Institute of machinary and metallurgy of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur, Russia 681005, Metallurgov st., 1), PhD (Phys-Math), head of laboratory, specialist in solid mechanics. E-mail: iamusver@mail.ru.*

Sosnin Alexander *— Institute of machinary and metallurgy of Far East Branch of RASciences (Komsomolsk-on-Amur, Russia 681005, Metallurgov st., 1), PhD (Eng), researcher, specialist in metal forming. E-mail: sosnin@imim.ru.*

Odinokov Valeriy *— Institute of machinary and metallurgy of Far East Branch of RASciences (Komsomolsk-on-Amur, Russia 681005, Metallurgov st., 1), DrSci (Eng), chief researcher, specialist in mechanical manufacturing processes. E-mail: odiokov1939@mail.ru.*