УДК 621.771.016-034.715

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ В ЛИСТАХ ИЗ СПЛАВА В95 ЭФФЕКТИВНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ

© 2014 г. **Ф.В. Гречников, В.В. Антипов, Я.А. Ерисов, А.Ф. Гречникова**

Самарский научный центр Российской академии наук (СамНЦ РАН)

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), г. Москва

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ) им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 03.07.14 г., подписана в печать 18.07.14 г.

Приведены теоретические положения и режимы формирования кристаллографической текстуры листов из алюминиевого сплава В95пч, обеспечивающей интенсификацию процессов формообразования деталей из алюмостеклопластиков обтяжкой. При горячей прокатке формируется текстура деформации (ориентировки *S* и *Bs*), которая при дальнейшей холодной прокатке усиливается. При отжиге происходит образование текстуры рекристаллизации (ориентировки {011}⟨100⟩, {023}⟨100⟩). При этом повышение предельного коэффициента обтяжки после холодной прокатки обеспечивается двухступенчатым отжигом, включающим скоростной нагрев на линии непрерывной термообработки и последующий полный отжиг в садочной печи с медленным охлаждением.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В95пч, алюмостеклопластик, СИАЛ, обтяжка, прокатка, термическая обработка, текстура, кристаллографическая ориентация, анизотропия.

Theoretical notions and formation modes of the crystallographic texture of the sheets made of the V95pch aluminum alloy, which provides the intensification of formation of detail made of fiber aluminum laminates by stretch-forming. The deformation texture (orientations *S* and *Bs*) is formed during hot rolling; it enhances during further cold rolling. The recrystallization texture is formed during annealing (orientations {011}⟨100⟩ and {023}⟨100⟩). An increase in the limiting stretch-forming coefficient after cold rolling is provided by two-stage annealing, which includes rapid heating at the continuous heat treatment line and subsequent complete annealing in an in-and-out furnace with slow cooling.

Keywords: V95pch aluminum alloy, fiber aluminum laminate, GLARE, stretch-forming, rolling, heat treatment, texture, crystallographic orientation, anisotropy.

ВВЕДЕНИЕ

Основную долю (около 70 %) планера современных пассажирских и транспортных самолетов составляют алюминиевые сплавы [1]. Однако кардинальное улучшение их свойств невозможно при использовании традиционных приемов металловедения путем легирования различными компонентами, включая совершенствование режимов термической и термомеханической обработок [2—4]. К тому же в авиационной технике нового поколения неметаллические композиты интенсивно вытесня-

Гречников Ф.В. – чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, профессор, и.о. председателя СамНЦ РАН (443001, г. Самара, Студенческий пер., 3А), зав. кафедрой обработки металлов давлением СГАУ. Тел.: (846) 337-53-81. E-mail: fgrech@ssc.smr.ru.

Антипов В.В. – канд. техн. наук, ст.науч.сотр. НИЛ-37 СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34), зам. ген. директора ВИАМ (105005, г. Москва, ул. Радио, 17). Тел.: (499) 261-62-28. E-mail: antipovvv@viam.ru.

Ерисов Я.А. – канд. техн. наук, вед. инженер НИЛ-37 СГАУ. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

Гречникова А.Ф. – канд. техн. наук, ассистент кафедры обработки металлов давлением СГАУ. E-mail: anna.grechnikova@alcoa.com.

ют алюминиевые сплавы в планере и создают вызов их доминирующему положению. Так, 50 % основных секций самолета Airbus A350, включая силовую конструкцию фюзеляжа и крыла, выполнены из композиционных материалов (КМ) [5].

Среди них отдельное место занимают гибридные слоистые металл-полимерные КМ — алюмостеклопластики (СИАЛ, за рубежом — GLARE), которые представляют собой многослойный конструкционный материал, состоящий из чередующихся тонких (0,3—0,5 мм) алюминиевых листов и прослоек стеклопластика с клеевым препрегом (толщиной 0,3—0,5 мм) различной структуры армирования в зависимости от условий работы элемента (рис. 1, *а*) [5—8]. В качестве материала металлической основы используют дуралюмины 1163АТ, Д16чАТ (2024-Т3), высокопрочные алюминиевые сплавы В95очТ2 (7075-Т6, 7475-Т76) и реже — алюминий-литиевые типа 1441Т11 [9—14].

СИАЛы обладают свойствами как алюминиевых сплавов, так и полимерных композиционных материалов [5, 6]. По сравнению с монолитными алюминиевыми листами главные достоинства алюмостеклопластиков состоят в чрезвычайно высоком сопротивлении развитию усталостных трещин (более чем в 10 раз), которые «вязнут» в клеевых прослойках, и весовой эффективности (плотность до 2,3 г/см^3). Это преимущество сохраняется и в клепаных соединениях, широко применяющихся в конструкциях аэрокосмической техники [8, 9]. Кроме того, гибридные листы СИАЛа обеспечивают существенно бóльшую пожаростойкость, чем монолитные алюминиевые листы [13]. И в отличие от полимерных КМ СИАЛы являются материалами с хорошим сопротивлением низкоскоростным ударам, которые имеют место, например, при случайном падении инструмента в процессе ремонтных работ и т.д. [9, 10].

Наиболее перспективным направлением применения алюмостеклопластиков является изготовление из них обшивок и профилей (см. рис. 1, *б*) методами обработки давлением, в том числе обтяжкой [15]. Однако штамповка СИАЛов часто сопровождается появлением дефектов (рис. 2): расслоениями, разрушением стеклопластика и появлением трещин в зоне гиба, что в основном связано с ограниченными деформационными возможностями алюминиевых листов, входящих в состав этого материала [16].

Улучшения технологичности алюмостеклопластиков, в частности увеличения предельного формоизменения [17—19] и усталостных характеристик [20—22], можно добиться за счет применения в составе СИАЛов алюминиевых листов с эф-

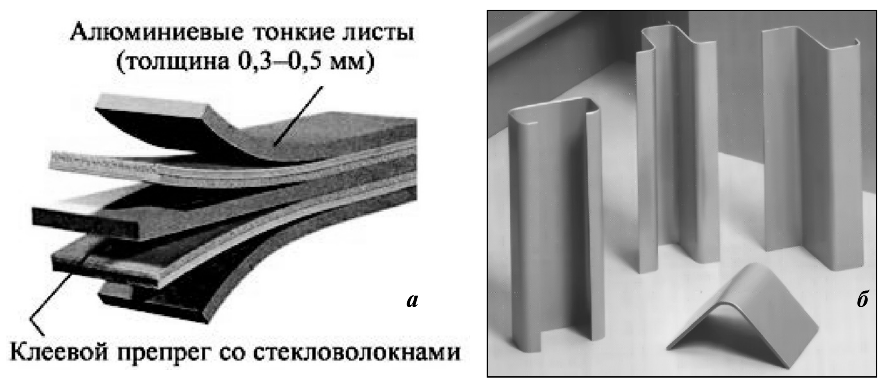

Рис. 1. Алюмостеклопластик СИАЛ-3/2 (***а***) и профили из него (***б***)

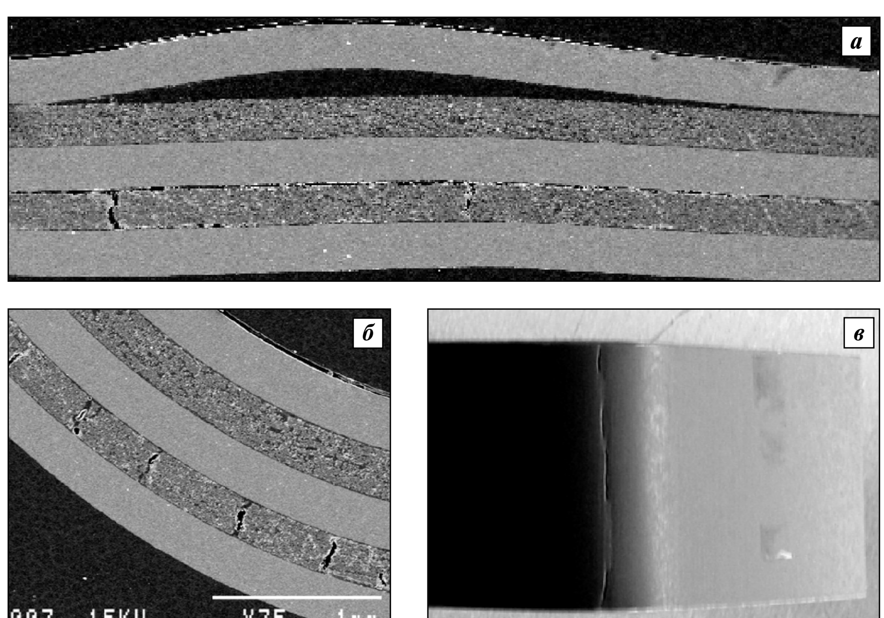

Рис. 2. Типовые дефекты при деформировании алюмостеклопластиков
а – расслоение, ***б*** – разрушение, ***в*** – трещины в зоне гиба

фективной кристаллографической ориентацией структуры.

В данной работе показана возможность повышения деформационных возможностей алюмостеклопластиков при обтяжке за счет использования в их составе ленты из алюминиевого сплава В95пч (7075) с эффективной кристаллографической ориентацией структуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того чтобы в технологических расчетах учесть кристаллографическую ориентацию структуры материала и сформулировать требования к ней, воспользуемся разработанным в [23] критерием пластичности и полученным на его основе предельным коэффициентом обтяжки ($K_{\text{обт}}^{\text{пр}}$) [24, 25], в которые входят ориентационные факторы текстуры и параметры кристаллической решетки:

$$K_{\text{обт}}^{\text{пр}} = 1 + \frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12} m}{\eta_{23} m + \eta_{31}} n. \qquad (1)$$

Здесь $m = \sigma_2/\sigma_1$ — соотношение главных напряжений при обтяжке; n — степенной коэффициент упрочнения; η_{ij} — обобщенный показатель текстурированного состояния:

$$\eta_{12} = \frac{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2}{Q - 1/5},$$

$$\eta_{23} = \frac{Q + \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3}{Q - 1/5},$$

$$\eta_{31} = \frac{Q + \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3}{Q - 1/5};$$

Q — характеристический параметр кристаллической решетки:

$$Q = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{3S'_{1111} - 3S'_{1122} - 3/2\, S'_{2323}};$$

Δ_i — ориентационные факторы (параметры) текстуры:

$$\Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2},$$

где h_i, k_i, l_i — индексы Миллера, определяющие i-е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с образцом.

Из формулы (1) следует, что величина предельной степени деформации при обтяжке в значительной степени зависит от сформированной при прокатке кристаллографической ориентации структуры листовых заготовок (рис. 3).

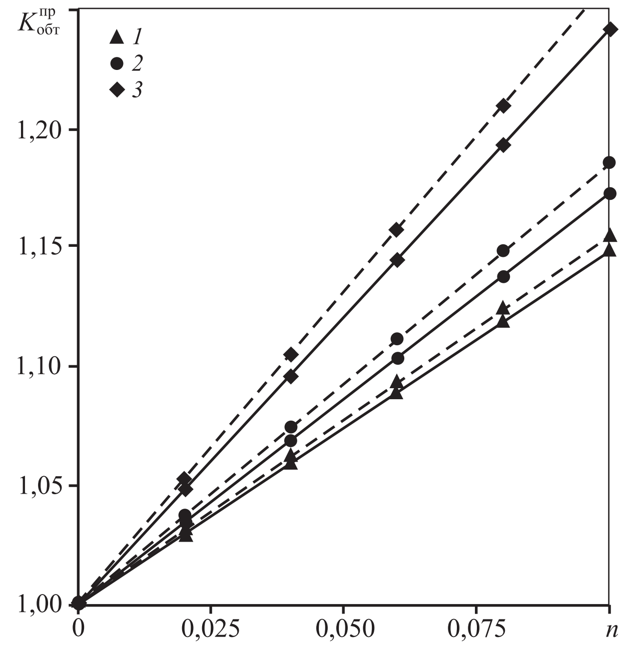

Рис. 3. Взаимосвязи между напряженным состоянием (m), модулем упрочнения (n), предельным коэффициентом обтяжки ($K_{\text{обт}}^{\text{пр}}$) и текстурными параметрами (Δ_i)

Сплошные линии – m = 0,1, штриховые – 0,05

Символ на рис. 3	Кристаллографическая ориентация структуры	Ориентационные параметры текстуры		
		Δ_1	Δ_2	Δ_3
1	{013}⟨213⟩	0,025	0,211	0,09
2	Изотропная среда	0,2	0,2	0,2
3	{111}⟨011⟩	0,25	0,25	0,333

Для решения обратной задачи, т.е. расчета эффективного состава компонент текстуры, который необходимо создать в листах в процессе прокатки, воспользуемся следующей системой уравнений [17]:

$$\begin{aligned} \sum_{\{hkl\}\langle uvw\rangle} p^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} \Delta_1^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} &= \Delta_1, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw\rangle} p^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} \Delta_2^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} &= \Delta_2, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw\rangle} p^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} \Delta_3^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} &= \Delta_3, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw\rangle} p^{\{hkl\}\langle uvw\rangle} &= 1, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $p^{\{hkl\}\langle uvw\rangle}$ — объемная доля i-й компоненты $\{hkl\}\langle uvw\rangle$.

Для разработки технологических режимов уп-

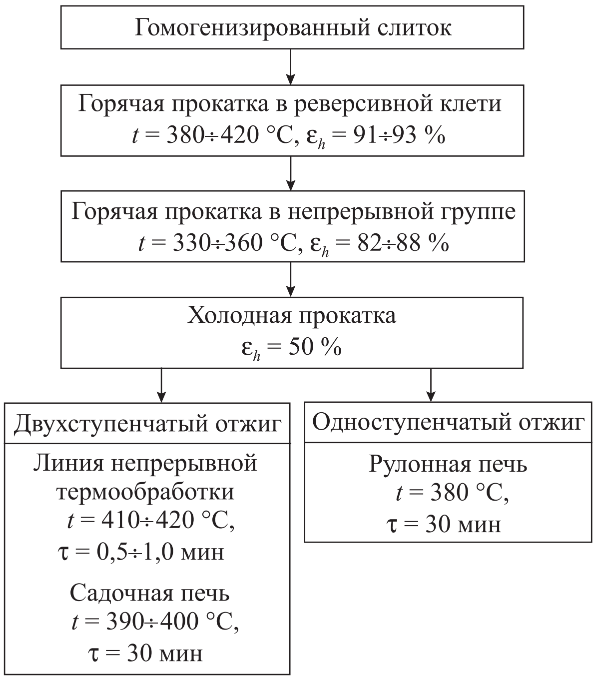

Рис. 4. Опытно-промышленные маршруты прокатки и отжига листов из сплава В95пч

равления текстурообразованием листов исследованы закономерности формирования параметров текстуры при прокатке и отжиге листов из сплава В95пч по маршрутам, приведенным на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований выявлено, что на этапе горячей прокатки в «рулоне» формируется устойчивая деформированная структура с характерными для этого состояния компонентами текстуры деформации типа *S* и *Bs* и показателями анизотропии с максимумом под углом 45° к направлению прокатки. При охлаждении рулонов с температуры завершения прокатки (330—360 °С) рекристаллизация не происходит, величина зерна и его кристаллографическая ориентировка не изменяются.

Холодная прокатка горячекатаных лент приводит к дальнейшему увеличению текстуры деформации (ориентировки *S*), т.е. неблагоприятный характер анизотропии в плоскости листа, сформированный при горячей прокатке, усиливается.

Результаты дальнейшего исследования изменения состава текстур холоднокатаных листов в зависимости от различных вариантов отжига представлены в табл. 1, из которых видно, что компоненты текстуры прокатки в обоих случаях трансформировались в характерные для текстуры рекристаллизации — разновидности текстуры Госса {011}⟨100⟩, {023}⟨100⟩.

Однако после двухступенчатого отжига (включающего скоростной нагрев на линии непрерывной термообработки и последующий полный отжиг в садочной печи с медленным охлаждением) текстура Госса стала менее острой. Кроме нее присутствуют и другие ориентировки рекристаллизации, а также наблюдается большее рассеяние текстуры (выше доля бестекстурной составляющей). Поскольку каждой ориентировке присуща своя анизотропия, наложение множества текстур приближает лист к трансверсально-изотропному состоянию. Стандартный же рулонный отжиг способствует преимущественному формированию только текстуры Госса, что делает лист резко анизотропным.

Таблица 1
Компоненты текстуры листов В95пч, отожженных по различным вариантам

Компоненты текстуры		Тип ориентировки	Объемная доля, %	
			Двухступенчатый отжиг	Одноступенчатый отжиг
Goss	{011}⟨100⟩	Рекристаллизационный	6	8
RC_{RD}	{023}⟨100⟩ {034}⟨100⟩		10	15
Bs_{RX}	{113}⟨211⟩		6	–
R	{142}⟨112⟩		5	–
Cu	{112}⟨111⟩	Деформационный	–	2
Дополнительные ориентировки			22	31
Бестекстурная составляющая			51	44

Таблица 2
Кристаллографические ориентировки отожженных листов из сплава В95пч, их ориентационные факторы и предельный коэффициент обтяжки

Режим отжига	Ориентировки	Объемная доля	Ориентационные факторы			Коэффициенты обтяжки		
			Δ_1'	Δ_2'	Δ_3'	$K_{обт1}^{пр}$	$K_{обт2}^{пр}$	$K_{обт3}^{пр}$
Двухступенчатый	{011}⟨100⟩	0,06	0,204	0,229	0,163	1,074	1,160	1,151
	{023}⟨100⟩	0,06						
	{013}⟨100⟩	0,04						
	{113}⟨211⟩	0,06						
	{142}⟨112⟩	0,05						
	Дополнительные	0,22						
	Бестекстурная	0,51						
Одноступенчатый	{011}⟨100⟩	0,08	0,198	0,244	0,156	1,065	1,143	1,140
	{034}⟨100⟩	0,12						
	{023}⟨100⟩	0,03						
	{112}⟨111⟩	0,02						
	Дополнительные	0,31						
	Бестекстурная	0,44						

Выполненные на основе формул (1) и (2) расчеты значений Δ_i и $K_{обт}^{пр}$ для обшивочных листов из сплава В95пч с различным составом текстуры представлены в табл. 2. Вычисления проведены для трех вариантов сочетания показателя напряженного состояния и модуля упрочения:

1) $m = 0{,}1$, $n = 0{,}05$;
2) $m = 0{,}05$, $n = 0{,}1$;
3) $m = 0{,}1$, $n = 0{,}1$.

Как видно из приведенных данных, повышение значений $K_{обт}^{пр}$ дает состав компонент текстуры, сформированный в результате двухступенчатого отжига, включающего скоростной нагрев на линии непрерывной термообработки и отжиг с регламентированным охлаждением в садочной печи. После такой обработки в листах формируются, кроме ориентировок типа {011}⟨100⟩, и другие, например {113}⟨211⟩, которые способствуют преимущественному развитию деформации удлинения под углом 45° к направлению прокатки и наименьшему — в направлении 90°. Поскольку объемная доля {113}⟨211⟩ сравнима с долей ориентировок типа {011}⟨100⟩, то их влияние будет как бы уравновешиваться, приводя к более равномерному распределению деформации в плоскости листа.

В целом проведенный анализ показывает, что повышение предельного коэффициента обтяжки, выравнивание показателей анизотропии и снижение средней величины зерна в обшивочных листах обеспечиваются холодной прокаткой со степенью деформации более 50 % и двухступенчатым отжигом.

Для дальнейшего улучшения параметров формообразования обшивочных листов необходимо в составе текстуры увеличивать объемную долю ориентировок, способствующих повышению предельного коэффициента обтяжки ($K_{обт}^{пр}$), а также добиваться равномерного сочетания ориентировок с различным соотношением показателей анизотропии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено видоизменение состава компонент текстуры и показателей анизотропии в зависимости от маршрутов холодной прокатки и режимов окончательного отжига, что обеспечивает принципиальную возможность управления формированием рационального состава компонент текстуры в листах из сплава В95пч, применяемых для алюмостеклопластиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фридляндер И.Н.* // Технол. легких сплавов. 2002. № 4. С. 21—27.
2. *Каблов Е.Н.* // Вестн. РАН. 2012. Т. 82, № 6. С. 520—530.
3. *Staley J.T., Lege D.J.* // J. de Physique IV. 1993. Vol. 3, № 7. P. 179—190.
4. *Rioja R., Liu J.* // Metal. Mater. Trans. A. 2012. Vol. 43, № 9. P. 3325—3337.
5. *Sinmazcelik T., Avcu E., Bora M., Coban O.* // Mater. Design. 2011. № 32. P. 3671—3685.
6. *Vlot A.* Glare: History of the Development of a New Aircraft Material. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
7. *Vlot A., Gunnink J.* Fibre Metal Laminates. An Introduction. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
8. *Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф.* и др. // Клеи. Герметики. Технологии. 2007. № 5. С. 15—17.
9. *Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В.* и др. // Там же. 2012. № 6. С. 13—17.
10. *Alderliesten R.* // Recent Pat. Eng. 2009. № 3. P. 25—38.
11. *Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф.* и др. // Технол. легких сплавов. 2009. № 2. С. 28—31.
12. *Антипов В.В.* // Металлург. 2012. № 5. С. 36—39.
13. *Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г.* // Цв. металлы. 2013. № 9. С. 46—50.
14. *Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г.* // Цв. металлы. 2013. № 9. С. 50—53.
15. *Sinke J.* // Appl. Composite Mater. 2003. Vol. 10, № 4-5. P. 293—305.
16. *Постнов А.В., Постнов В.И., Казаков И.А.* // Изв. СамНЦ РАН. 2009. №3 (2). С. 499—508.
17. *Гречников Ф.В.* Деформирование анизотропных материалов: Резервы интенсификации. М.: Машиностроение, 1998.
18. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Арышенский Е.В.* // Вестн. СГАУ. 2011. № 2 (26). С. 158—168.
19. *Арышенский В.Ю., Гречникова А.Ф., Дриц А.М., Соседков С.М.* // Технол. легких сплавов. 2010. № 3. С. 22—30.
20. *Lowden M.A.W., Hutchinson W.B.* // Metal. Trans. A. 1975. Vol. 6, № 3. P. 441—448.
21. *Güngür S., Edwards L.* // Mater. Sci. Eng. A. 1993. Vol. 160, № 1. P. 17—24.
22. *Wu X.J., Wallace W., Raizenne M.D., Koul A.K.* // Metal. Mater. Trans. A. 1994. Vol. 25, № 3. P. 575—588.
23. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А.* // Вестн. СГАУ. 2012. № 1 (32). С. 94—99.
24. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А.* // Изв. СамНЦ РАН. 2012. № 4. С. 293—298.
25. *Арышенский В.Ю., Гречникова А.Ф., Ерисов Я.А.* // Вестн. СГАУ. 2012. № 2 (33). С. 142—148.