

УДК 669.715

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА КАЧЕСТВО ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

КАЛИНИНА Н. Е.¹, *д.т.н., проф.*,
ВИЛИЩУК З. В.², *ведущий инженер*,
НОСОВА Т. В.³, *к.т.н., доц.*,
МАМЧУР С. И.⁴, *к.т.н., доц.*

- ¹ Кафедра технологий производства, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина, +38 (095) 550-28-00, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru ORCID ID: 0000-0003-3810-6778
- ² Кафедра технологий производства, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина, +38 (066) 308-15-77, e-mail: zoyavilischuk@gmail.com
- ³ Кафедра технологий производства, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина, +38 (096) 570-69-35
- ⁴ Кафедра технологий производства, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина, +38 (098) 411-22-46

Аннотация. *Цель.* Изучение влияния внутренних дефектов на свойства деформированных заготовок алюминиевых сплавов. *Материал.* В качестве материала для настоящего исследования были выбраны деформируемые алюминиевые сплавы В95 системы Al–Zn–Mg–Cu и 01570 системы Al–Mg–Sc. *Методика.* Исследовались внутренние дефекты, возникающие при деформировании в полуфабрикатах, зеренная структура, методы улучшения заготовок и механические свойства данных алюминиевых сплавов после обработки рафинирующими добавками и комплексным модификатором на основе карбида кремния. *Результаты.* Проведенный комплекс исследований показал активное влияние метода получения заготовок полуфабрикатов на возникновение внутренних дефектов. При этом, наименьшее количество внутренних дефектов выявлено при электрофлюсовом рафинировании и модифицировании нанодисперсными тугоплавкими частицами. Получена более дисперсная структура сплавов В95 и 01570, что приводит к повышению комплекса механических и технологических свойств. *Научная новизна.* Для алюминиевых сплавов установлено связь между обработкой расплава (рафинирование, модифицирование) и образованием внутренних дефектов в заготовках. *Практическая значимость.* Понимание причин образования внутренних дефектов и методов их устранения, позволит управлять структурой и комплексом технологических и механических свойств, повышая качество и выход годного металлопроката.

Ключевые слова: внутренние дефекты; свойства; рафинирование; модифицирование; деформируемые алюминиевые сплавы

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА ЯКІСТЬ ДЕФОРМОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

КАЛІНІНА Н. Є.¹, *д. т. н., проф.*,
ВІЛІЩУК З. В.², *провідний інженер*,
НОСОВА Т. В.³, *к. т. н., доц.*,
МАМЧУР С. І.⁴, *к. т. н., доц.*

- ¹ Кафедра технологій виробництва, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна +38 (095) 550-28-00, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru ORCID ID: 0000-0003-3810-6778
- ² Кафедра технологій виробництва, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна +38 (066) 308-15-77, e-mail: zoyavilischuk@gmail.com
- ³ Кафедра технологій виробництва, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна +38 (096) 570-69-35
- ⁴ Кафедра технологій виробництва, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна +38 (098) 411-22-46

Анотація. *Мета.* Вивчення впливу внутрішніх дефектів на властивості деформованих заготовок з алюмінієвих сплавів. *Матеріал.* В якості матеріалу для цього дослідження були обрані деформуючі алюмінієві сплави В95 системи Al–Zn–Mg–Cu і 01570 системи Al–Mg–Sc. *Методика.* Досліджувалися внутрішні дефекти, що виникають при деформуванні в напівфабрикатах, зеренна структура, методи поліпшення заготівель і механічні властивості даних алюмінієвих сплавів після обробки рафинирующими добавками і комплексним модифікатором на основі карбїду кремнію. *Результати.* Проведений комплекс досліджень показав активний вплив методу отримання заготовок напівфабрикатів на виникнення внутрішніх дефектів. При цьому, найменша кількість внутрішніх дефектів виявлено при електрофлюсовому рафїнуванні і

модифікуванні нанодисперсними тугоплавкими частинками. Отримана більш дисперсна структура сплавів В95 та 01570, що призводить до підвищення комплексу механічних і технологічних властивостей. **Наукова новизна.** Для алюмінієвих сплавів встановлено зв'язок між обробкою розплаву (рафінування, модифікування) і утворенням внутрішніх дефектів в заготовках. **Практична значимість.** Розуміння причин утворення внутрішніх дефектів і методів їх усунення, дозволить керувати структурою і комплексом технологічних і механічних властивостей, підвищуючи якість і вихід придатного металопрокату.

Ключові слова: внутрішні дефекти; властивості; рафінування; модифікування; деформуючі алюмінієві сплави

THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE QUALITY OF THE WROUGHT ALUMINUM ALLOYS

KALININA N. E. ¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.
VILISHCHUK Z. V. ², lead engineer,
NOSOVA T. V. ³, Cand. Sc. (Tech.), Doc.,
MAMCHUR S. I. ⁴, Cand. Sc. (Tech.), Doc.

Annotation. Objective. Study of the effect of internal defects on the properties of the deformed billets of aluminum alloys. **Material.** As the material for the present study were selected wrought aluminum alloys B95 system Al–Zn–Mg–Cu and 01570 of the system Al–Mg–Sc. **Methods.** Investigated internal defects arising during deformation in the semis, grain structure, methods of improvement of billets and mechanical properties of aluminium alloys after processing, refining additives and a complex modifier based on silicon carbide. **Results.** Conducted complex research has shown the active influence of the method of obtaining blanks of semi-finished products on the occurrence of internal defects. In this case, the least amount of internal defects detected during electro refining and modification of nanodispersed refractory particles. Received a more dispersed structure of alloys 01570 B95 and that leads to increasing of complex of mechanical and technological properties. **Scientific novelty.** For aluminum alloys, the relation between the processing of the melt (refining, modification) and the formation of internal defects in workpieces. **Practical significance.** Understanding of the causes of the formation of internal defects and methods of their elimination, will allow you to control the structure and the complex technological and mechanical properties, enhancing the quality and yield of rolled products.

Keywords: internal defects; properties; refining; modification; wrought aluminium alloys

Введение

В авиационно-космической технике Украины и стран СНГ широко используются литейные и деформируемые алюминиевые сплавы [1, 2]. Наиболее перспективными из них являются сплавы систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Mg–Sc.

Сплавы этих систем должны обладать сочетанием удельной прочности и технологической пластичности, удовлетворительной коррозионной стойкостью [3].

Дефекты, возникающие во время технологических операций и эксплуатации, негативно влияют на формирование комплекса свойств алюминиевых сплавов.

Существует наследственность свойств готовых изделий в зависимости от методов изготовления заготовок. Поэтому необходим контроль за образованием внутренних дефектов: величины линейной усадки, горячих трещин, несплошностей, расслоений при выплавке сплавов и кристаллизации.

Цель

Целью настоящей работы являлось изучение влияния внутренних дефектов на свойства деформированных заготовок алюминиевых сплавов.

Материал

Материалом исследования являлись деформируемые алюминиевые сплавы В95 системы Al–Zn–Mg–Cu и 01570 системы Al–Mg–Sc.

Методика и результаты исследования

В работе рассмотрены факторы, влияющие на наличие дефектов деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Mg–Sc. Устранение внутренних дефектов, таких как несплошности, пористость должно приводить к улучшению качества получаемых полуфабрикатов.

Многообразие факторов, влияющих на образование несплошностей в деформированных полуфабрикатах затрудняет не только описание, но и разработку единой теории их образования. В таблице 1 приведена классификация внутренних дефектов в деформируемых полуфабрикатах.

Исследованы полуфабрикаты сплавов В95, 01570 после горячей деформации. Зона расслоения отличается полным отсутствием металлической связи из-за наличия окисной пленки на поверхности. Большое число расслоений наблюдается в профилях сложной формы или переменного сечения, при прессовании которых происходит резко выраженное неравномерное течение металла.

Таблица 1

Классификация внутренних дефектов в деформированных полуфабрикатах / Classification of internal defects in semimanufactures

Тип	Наименование дефекта	Внешний вид дефекта	Микроструктура дефекта
Расслоение			
1	Включение окислов, не содержащих водорода	Поверхность расслоения окислена	Включения окисной пленки. Раскрытия нет.
2	Включения окислов, содержащих водород	Поверхность расслоения окислена	Несплошность, расположенная вдоль течения металла. Раскрытие может достигать 1 мм и более
3	Газовое включение, не содержащее окислов	Поверхность расслоения не окислена и имеет зеркальный вид	Несплошность, расположенная вдоль течения металла. Раскрытие может достигать 1 мм и более
Шиферность			
1	Шиферность, связанная с влиянием структурной неоднородности	Слоистый излом	Строчечное распределение металлических составляющих сплава. Раскрытия нет
2	Шиферность, связанная с влиянием водорода и окисных включений	Слоистый окрашенный излом	Строчечное распределение металлических составляющих сплава. Раскрытие появляется только в процессе разрушения
3	Шиферность, связанная с влиянием водорода	Слоистый излом	Строчечное распределение металлических составляющих сплава. Раскрытие появляется только в процессе разрушения

В работе [1] при изучении механических свойств профиля с законцовкой из сплава В96 выявлен брак по относительному удлинению, связанный с наличием рыхлот в изломе образцов. Для труднодеформируемых сложнелегированных сплавов важна схема пластической деформации. Важнейшим фактором, влияющим на качество полуфабрикатов, является технология плавки и литья. Для уменьшения пораженности дефектами рекомендуется оттаивание расплава до 4 часов перед литьем. Существенную роль в плавно-литейном переделе играет рафинирование расплава.

Также для улучшения литейных свойств (жидкотекучесть, литейная усадка и другие) эффективным является применение процесса модифицирования. Для деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Sc в работе применен комплексный модификатор на основе карбида кремния SiC β-модификации. Обработка расплава комплексным модификатором позволило измельчить структуру, уменьшить пористость и газонасыщение сплава.

На технологических пробах измерена линейная усадка сплава 01570 в исходном и модифицированном состояниях. Результаты приведены в таблице 2.

При модифицировании линейная усадка сплава 01570 при литье в кокиль уменьшается, что свидетельствует о снижении газонасыщения расплава. Уменьшение линейной усадки уменьшает выход бракованных заготовок, обеспечивает более стабильную структуру в объеме детали. Уменьшение газонасыщения в металле снижает пористость сплава и, следовательно при

деформировании снижает количество дефектов в полуфабрикатах.

Таблица 2

Линейная усадка сплава 01570 / Linear shrinkage by alloy 01570

№ образца	01570		01570+SiC	
	Линейная усадка, мм	% усадки	Линейная усадка, мм	% усадки
1	14	13,7	5	4,9
2	12	11,9	5	4,9

Между структурой слитка, пластичностью сплавов при температурах горячей деформации и качеством полуфабрикатов существует взаимосвязь. Слитки с веерной и столбчатой структурой более склонны к образованию расслоений [2], слитки с мелкозернистой структурой имеют большую пластичность, чем слитки с крупнозернистой веерной структурой, что особенно заметно при повышенных температурах испытаний (табл. 3).

Слитки с мелким зерном (170 мкм) имели максимальную пластичность при низких температурах горячей деформации (380...420°C). В слитках с крупным зерном (310 мкм) максимальная пластичность наблюдалась в интервале 480...520°C. Доказано, что увеличение размера зерна в сплаве увеличивает вероятность образования микротрещин при деформации. Заготовки с крупнозернистой структурой характеризуются меньшей работой разрушения, чем металл с мелкозернистой структурой.

Таблица 3

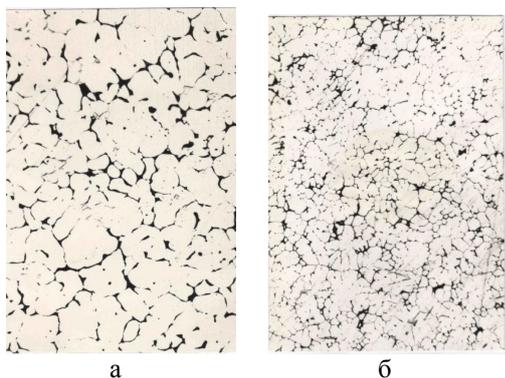
Зависимость механических свойств сплава В95 от характера микроструктуры / Relation mechanical properties on the format of the microstructure by alloy V95

Характер микроструктуры	Температура испытания, °С					
	20			400		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Зерно крупное, 310 мкм	500	450	12,0	84,0	68,0	68,2
Зерно мелкое, 170 мкм	580	540	10,0	86,5	72,0	84,6

Таким образом для повышения комплекса механических свойств, при формировании структуры необходимо получить мелкое зерно в заготовке.

Одним из способов уменьшения размера зерна алюминиевых сплавов является модифицирование структуры нанодисперсными тугоплавкими композициями (рис. 1)

Исследования показали, что в модифицированном сплаве 01570 уменьшается размер зерна в 1,5 раза: с 240 до 154 мкм. Измельчение макрозерна препятствует укрупнению дендритного строения.



а – немодифицированный,
б – модифицированный

Рис. 1. Зернистая структура сплава 01570, x50

В таблице 4 приведены результаты испытаний на расслаивающую коррозию алюминиевого сплава 01570 в исходном и модифицированном состояниях.

Таблица 4.

Результаты испытаний на расслаивающую коррозию / Test results for exfoliation corrosion

Сплав	Расслаивающая коррозия. Балл по ГОСТ 9.904–82
01570	Пузыри диаметром 2...3 мм на площади 10%. Балл 4
01570+SiC	Пузырей нет. Балл коррозии 2.

Таким образом, огрубление структуры слитка, приводящее к понижению пластичности металла при температурах горячей деформации, способствует увеличению пораженности полуфабрикатов расслоениями.

Поскольку расслоения не обнаруживаются в литом металле, а наблюдаются в полуфабрикатах, то очевидно, что дефекты формируются в процессе деформирования. Следовательно, условия деформации должны оказывать влияние на степень пораженности полуфабрикатов дефектами. Большое влияние оказывают технологические характеристики – равномерность, скорость и степень деформации. Для алюминиевых сплавов установлено, что чем выше степень деформации, тем больше выявляемость дефектов в изломах полуфабрикатов. Дефекты в виде микро- и макронесплошностей образуются в первую очередь в зоне с повышенной интенсивностью деформации.

Для сложнoleгированных сплавов В95. В96 установлено благоприятное воздействие снижения температуры деформации на качество плит и штампованных панелей (рис. 2).

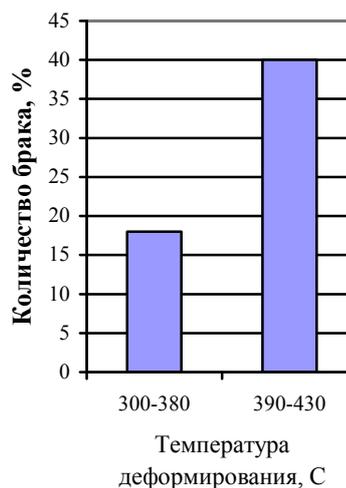


Рис. 2. Влияние температуры деформации на количество брака расслоений в штамповках сплава В95

В штамповках, полученных из плит, деформированных при температурах 420...450°С, число дефектов в 5 раз больше, чем из плит, деформированных в интервале 360...390°С.

Расслоение можно представить как локальное разрушение металла в процессе деформации. Очевидно, что чем более однороден и пластичен материал, тем меньше вероятность появления дефекта. Приведенные экспериментальные данные показывают, что источниками локального понижения пластичности металла при обработке давлением могут быть: комплексы окисел-водород, пористость слитка, концентрированные неоднородности в структуре слитка, скопления хрупких интерметаллидов по границам зерен.

Таким образом, источники появления расслоений заложены в слитке. В процессе пластической деформации неравномерное распределение давлений и температур приводит к неоднородности деформации по объему заготовки. Разница в скоростях течения материала вызывает появление локальных растягивающих и сдвиговых напряжений, которые релаксируют без нарушения сплошности. При превышении запаса пластичности идет локальное разрушение материала – образование между объемами плоской трещины, ориентированной вдоль течения металла. Чем больше слиток поражен несовершенствами и чем больше степень деформации, тем в большей мере следует ожидать возникновения несплошностей в процессе деформации.

Несплошности в материале неустойчивы, они могут возникать и залечиваться в процессе деформации. Устойчивыми внутренние несплошности становятся тогда, когда они заполнены водородом. Распад твердого раствора водорода в металле при тепловой обработке и деформация приводят к выделению водорода из несплошности и их развитию. Можно выделить три стадии возникновения и развития расслоений:

1. Ориентирование дефектов слитка в направлении течения металла. Создаются предпосылки образования шиферности, но расслоения не возникают.

2. Нарушение сплошности матрицы. Поврежденные в процессе деформации участки матрицы обнаруживаются как участки вязкого разрушения.

3. Стабилизация несплошностей вследствие поступления в них водорода из пересыщенного твердого раствора. Увеличение размеров несплошностей при термической обработке полуфабрикатов.

Выводы

1. Выявлено наличие внутренних дефектов в деформируемых алюминиевых сплавах систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Mg–Sc.

2. В результате обработки расплавов рафинирующими добавками и комплексным модификатором достигнуто снижение расслоений в алюминиевых сплавах В95 и 01570.

3. Достигнуто измельчение зеренной структуры модифицированных алюминиевых сплавов, что приводит к повышению комплекса механических и технологических свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дриц М.Е. Разрушение алюминиевых сплавов при растягивающих напряжениях / М.Е. Дриц, Ю.П. Корольков, Ю.П. Гук и др. – М.: Наука, 1973. – 347 с.
2. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и слитков / И.И. Новиков. – М.: Наука, 1966. – 153 с.
3. Вилищук З.В. Наномодификаторы перспективных алюминиевых сплавов / З.В. Вилищук, Н.Е. Калинина // Вісник Дніпропетровського національного університету. Ракетно-космічна техніка, Дніпропетровськ. – 2011. – Вип.15, том 2. – С. 26-29.
4. Вилищук З.В. Коррозионная стойкость наномодифицированных алюминиевых сплавов / З.В. Вилищук, Н.Е. Калинина, А.В. Калинин, А.Ю. Сальникова // Вісник Дніпропетровського національного університету. Ракетно-космічна техніка, Дніпропетровськ. – 2010. – Вип.14, том 2.– С. 83-87.
5. Вилищук З.В. Повышение коррозионных свойств алюминиевых сплавов при наномодифицировании / З.В. Вилищук, Е.А. Мусина // Вісник Дніпропетровського національного університету. Ракетно-космічна техніка, Дніпропетровськ. – 2014. – Вип.17, том 1.– С. 22 – 26.
6. Солцев Ю.П. Спеціальні конструкційні матеріали / Ю.П. Солцев, С.Б. Беліков, І.П. Волчок, С.П. Шейко. – Запоріжжя: ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ, 2010. – 536 с.
7. Дриц М.Е. Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка, применение. / М.Е. Дриц. – М.: Металлургия, 1979. – 679 с.
8. Фридляндер И.Н. Металловедение алюминия и его сплавов. Справочник. / И.Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1983. – 522 с.
9. Авіаційно-космічні матеріали та технології / В.А. Богуслаєв, А.Я. Качан, Н.Є. Калініна та ін. – Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2009. – 383 с.
10. Мальцев М.В. Металлография цветных металлов и сплавов. / М.В. Мальцев, Т.А. Барсукова, Ф.А. Борин. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 372 с.
11. Калініна Н.Є. Методи захисту матеріалів від корозії. Жаростійкі сплави: навч. посібник / Н.Є. Калініна, Ю.В. Ткачов, В.Т. Калінін. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2007. – 61 с.
12. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
13. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в авиационных конструкциях / И.Н. Фридляндер, В.М. Белецкий, Г.А. Кривов // Технолог. системы. – 2000. – № 1. – С. 5-17.

REFERENCES

1. Drits M.E., Korolkov U.P., Guk U.P. *Razrushenie aluminievih splavov pri rastjagivajushih naprjaghenijah* [Destruction of aluminum alloys under tensile stresses]. Moscow: Nauka, 1973, 347 p. (in Russian).
2. Novikov I.I. *Gorjachelomkost tsvetnih metallov i slitkov* [Hot brittleness of nonferrous metals and bullion]. Moscow: Nauka, 1966, 153 p. (in Russian).
3. Vilischuk Z.V., Kalinina N.E. *Nanomodifikatori perspektivnih aluminievih splavov* [Nanomodifiers for perspective aluminum alloys]. *Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu. Raketno-kosmichna tehnika* [Bulletin of Dnipropetrovsk national university. Rocket and space technique]. Dnipropetrovsk, 2011, Vol. 15, № 2, pp. 26–29. (in Russian).
4. Vilischuk Z.V., Kalinina N.E., Kalinin A.V., Salnikova A.U. *Korroziionnaja stojkost nanomodifitsirovannih aluminievih splavov* [The corrosion resistance of aluminum alloys nanomodified]. *Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu. Raketno-kosmichna tehnika* [Bulletin of Dnipropetrovsk national university. Rocket and space technique]. Dnipropetrovsk, 2010, Vol. 14, № 2, pp. 83–87. (in Russian).
5. Vilischuk Z.V., Musina E.A. *Povishenie korroziionnih svojstv aluminievih splavov pri modifitsirovanii* [Increasing the corrosive properties of aluminum alloys at nanomodified]. *Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu. Raketno-kosmichna tehnika* [Bulletin of Dnipropetrovsk national university. Rocket and space technique]. Dnipropetrovsk, 2014, Vol. 17, № 1, pp. 22–26 (in Russian).
6. Solntsev U.P., Belikov S.B., Volchok I.P., Shejko S.P. *Spetsialni konstruktsijni materialy* [Special construction materials]. Zaporizhzhja: VALPIS–Poligraf, 2010, 536 p. (in Ukrainian).
7. Drits M.E. *Aluminievie splavi. Svojstva, obrabotka, priminenie* [Aluminium alloys. Properties, processing, application]. Moscow: Metallurgia, 1979, 679 p. (in Russian).
8. Fridljander I.N. *Metallovedenie aluminiya I ego splavov. Spravochnik*. [Metallurgy of aluminum and its alloys. Directory]. Moscow: Metallurgia, 1983, 522 p. (in Russian).
9. Boguslaev V.A., Kachan A. Ja. Kalinina N.E. *Aviatsijno-kosmichni materialy ta tehnologii* [Aerospace materials and technologies]. Zaporizhzhja: VAT “MotorSich”, 2009, 383 p. (in Ukrainian).
10. Maltsev M.V., Barsukova T.A., Borin F.A. *Metallografija tsvetnih metallov i splavov* [Metallography of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo literaturi po chernoj i tsvetnoj metallurgii, 1960, 372 p. (in Russian).
11. Kalinina N.E., Tkachov U.V., Kalinin V.T. *Metodi zahistu materialiv vid korrozii. Gharostojkii cplavi: navch. posibnik* [Methods of protecting materials against corrosion. Heat-resistant alloys: teach. Manual]. Dnepropetrovsk: RVV DNU, 2007, 61 p. (in Ukrainian).
12. Maltsev M.V. *Metallografija promishlennih tsvetnih metallov i splavov* [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgija, 1970, 368 p. (in Russian).
13. Fridljander I.N., Beletskij V.M., Krivov G.A. *Aluminiievie splavi v aviatsionnih konstruktsijah* [Aluminium alloys in airframe]. *Tehnolog. sistemi* [Technolog. Systems]. 2000, №1, pp. 5-17 (in Russian).

Статья рекомендована к публикации в журнале «Технологические системы», В.И. Большаковым и доктором техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)