



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-94-99>
УДК 621.771.620.18

Поступила 12.11.2019
Received 12.11.2019

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК

Т. В. ЛЫСЕНКО, В. В. ЯСЮКОВ, О. И. ВОРОНОВА, Е. Н. КОЗИШКУРТ, К. А. КРЕЙЦЕР, Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина, пр. Шевченко, 1.
E-mail: igonua@gmail.com

Наноразмерные частицы ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), введенные в расплав, позволяют получать отливки из железоуглеродистых и цветных сплавов с однородной мелкозернистой структурой в различных сечениях. Использование наноматериалов изменяет режимы консолидации компонентов композиционных отливок, повышает устойчивость технологических процессов, обеспечивает эксплуатационную надежность литых деталей. Управление структурой отливок в присутствии наночастиц достигается наличием физической поверхности раздела с жидкой фазой, что определяет гетерогенный механизм кристаллизации.

Ключевые слова. Наноразмерные частицы, нанотехнология, наномодифицирование сплавов, механические и служебные свойства отливок.

Для цитирования. Лысенко, Т. В. Использование нанотехнологий при изготовлении отливок / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, О. И. Воронова, Е. Н. Козишкурт, К. А. Крейцер // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-94-99>.

THE USE OF NANOTECHNOLOGY IN THE MANUFACTURE OF CASTINGS

T. V. LYSENKO, V. V. JASJUKOV, O. I. VORONOVA, E. N. KOZISHKURT, K. A. KREITSER,
Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine, I, Shevchenko ave. E-mail: igonua@gmail.com

Nanoscale particles ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), entered into the melt, allow to obtain castings from iron-carbon and non-ferrous alloys with a homogeneous fine-grained structure in different sections. The use of nanomaterials changes the modes of consolidation of components of composite castings, increases the stability of technological processes, and provides technological reliability of cast parts. The control of the castings structure in the presence of nanoparticles is achieved by the presence of a physical interface with the liquid phase, which determines the heterogeneous crystallization mechanism.

Keywords. Nanoscale particles, nanotechnology, nanomodification of alloys, mechanical and service properties of castings.

For citation. Lysenko T. V., Jasjukov V. V., Voronova O. I., Kkozishkurt E. N., Kreitser K. A. The use of nanotechnology in the manufacture of castings. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 4, pp. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-94-99>.

Актуальность работы. Термин «Нанотехнология» впервые появился в 1981 г. [1] и быстро завоевал всеобщий интерес в связи с тем, что наноразмерные частицы ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) позволяют решить, в том числе, давнее стремление литейщиков [2] – получение отливок с однородной мелкокристаллической структурой в различных сечениях. Это повышает физико-механические свойства отливок, эксплуатационную надежность литых деталей, укрепляет конкурентоспособность литья.

Нанотехнология подразумевает создание и использование материалов нанометрового масштаба, полученных искусственным путем, которые характеризуются новыми свойствами. В настоящее время к объектам нанотехнологии относят индивидуальные частицы – пленки, стержни, трубки, висеры, а также объединение наноструктурных материалов. Многие фундаментальные свойства веществ в значительной степени зависят от размеров кристаллов в наноразмерном состоянии. Это приводит к трансформации свойств не путем изменения химического состава компонентов, а путем регулирования их размеров и формы [3].



Рис. 1. Влияние размера наноструктурных элементов на изменение прочности и пластичности сплавов

Механическая прочность кристаллических материалов, описываемая выражением Холла-Петча, зависит от размера зерен. Это не всегда справедливо для нанометрических материалов. Очевидно, с учетом развитой физической поверхности раздела наноструктур с расплавом в процессе кристаллизации они могут обладать высокой прочностью в сочетании с высокой пластичностью [4] (рис. 1).

Постановка задачи. Особенность свойств веществ в наноразмерном масштабе и связанные с этим фундаментальные различия термодинамических и кинетических механизмов кристаллизации расплавов объясняются многими факторами. Среди них следует отметить развитую поверхность с большим количеством дислокаций, плотность которых у наноматериалов несравненно выше, что обуславливает повышенную свободную энергию системы, интенсивное взаимодействие с расплавом. Нанообъекты имеют физическую поверхность раздела с расплавом. Это определяет гетерогенный механизм кристаллизации.

Исходя из сказанного выше, применение нанообъектов с целью управления кристаллизационными процессами, протекающими в литейной форме, имеет большое значение. Это может быть как изменение свойств сплава, так и формирование благоприятной структуры при модифицировании.

Качество композиционного литья во многом зависит от получения гомогенной и управляемой по геометрическим параметрам контактной зоны двух элементов детали, где протекают сложные физико-химические явления, часто при нестационарном тепловом режиме [5]. Использование наноматериалов позволяет повысить устойчивость технологического процесса получения таких отливок, обеспечить высокую эксплуатационную надежность литых деталей.

Цель работы. Обобщение существующего научно-производственного опыта применения наноструктурных материалов и оценка их влияния на механические и служебные свойства отливок.

Сущность и методы исследования. При исследовании свойств нанопорошков отмечается активная поверхность, приводящая к изменению макроструктуры самих порошков [6]. Поэтому технология производства порошков учитывает эти особенности и постоянно совершенствуется. Определены основные требования к наноматериалам, вводимым в расплав. Это наличие смачивания, отсутствие коагуляции и растворения в расплаве. Разрабатываются и совершенствуются способы введения наночастиц в расплав при модифицировании с учетом их равномерного распределения в объеме. При изучении взаимодействия нанопорошков с медными сплавами [7] исследованы фазовый и фракционный составы оксидов и карбидов вольфрама и циркония, установлены температуры изоморфных и полиморфных превращений, температуры начала взаимодействия частиц с медным сплавом.

Исследованиями [8] установлено наличие структурного элемента – фуллерена, влияющего на строение железоуглеродистых сплавов. На фуллеренах формируются углеродные наночастицы – фуллериты, являющиеся центрами кристаллизации, имеющими размерное и структурное сходство параметров их кристаллической решетки с параметрами решетки аустенита при кристаллизации доэвтектического чугуна.

При использовании метода получения наночастиц электроискровой обработкой металлических гранул в жидкости получают наночастицы с высокой энергонасыщенностью и широким спектром структурных состояний и свойств [9]. Параметры процесса оказывают влияние как на восстановление, так и окисление продуктов обработки.

К экономически выгодным процессам производства наноструктур с регулируемыми параметрами относят газофазный синтез, термическое разложение солей, диспергирование, интенсивную пластическую деформацию, детонационный синтез и др. При использовании любого метода необходимо ограничивать взаимодействие наноматериалов с окружающей средой при изготовлении, хранении, транспортировке путем создания контролируемой инертной атмосферы.

Приведенные выше свойства наноструктур позволяют использовать их для модифицирования сталей путем введения в расплав нанодобавок в составе специальных лигатур. Добавки SiO₂ (аэросил) и SiC вводили в сталь 20Л в виде лигатур на основе алюминия [10]. Полученные результаты

свидетельствуют об измельчении зерна литой структуры, что подтверждает механизм гетерогенного зародышеобразования. При этом повышаются механические свойства и сопротивление хрупкому разрушению при динамических нагрузках.

Аналогичные результаты достигнуты при модифицировании сталей с перитектическим превращением (сталь 20ГЛ) нанодисперсными карбонитридами титана и алюминия в комплексе с микролегированием азотом [11]. При этом в процессе кристаллизации формируется мелкозернистая литая структура, нитриды алюминия при затвердевании ограничивают рост зерна аустенита при рекристаллизации.

При оценке влияния модифицирования нанодисперсными материалами на свойства отливок стрелочных переводов из стали 110Г13Л [12] установлено значительное улучшение однородности структуры, повышение плотности и изотропности. Это способствует более равномерному распределению внутренних напряжений под нагрузкой, уменьшению трещин, пористости, сколов.

Повышение эксплуатационной надежности литых деталей ответственного назначения достигали легированием Nb либо W и наномодифицированием TiCN и SiC [13]. Это позволило снизить брак отливок, устранить возникновение горячих трещин, сформировать мелкозернистую структуру.

Основными требованиями к чугунным мелющим шарам являются высокая прочность и износостойкость, позволяющие измельчать твердые материалы без значительной потери эксплуатационных свойств. Для достижения этой цели применяли [14] наномодифицирование. Наномодификаторы эффективно влияют на кристаллизацию графитовой фазы, включения стэдита, первичное зерно чугуна, неметаллические включения, используя их в качестве гетерогенных центров кристаллизации. В качестве наноматериалов выбрали TiCN, SiC, TiSi, В₄C. Применение этих соединений повысило прочностные свойства чугуна, способствовало устранению усадочных явлений, полной перлитизации матрицы чугуна.

Авторы [15] рекомендуют модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ карбонитридом титана в наноразмерном состоянии. Наночастицы смешиваются с порошком металла – основы на атриторах с последующим брикетированием и вводом брикетов в расплав. В качестве связующего порошковой смеси используют растворы алюмината натрия либо фтористого кальция. Наночастицы (размером до 100 нм) получают плазмохимическим синтезом. Измельчение зерна сплава приводит к повышению предела выносливости, сопротивления удару, пластичности и жаропрочности.

Для получения высоких и стабильных по сечению отливок свойств проводили модифицирование сплава АК7 ультрадисперсным модификатором TiCN [16]. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний сплава АК7

Сплав	Заливка	σ_B , МПа	δ , %	Твердость, НВ	Плотность, г/см ³
АК7*	Без модификатора	235	3,2	78	2,715
	С модификатором	276	6,0	80	2,736

*Скорость поршня при прессовании 40 м/с.

Положительный эффект достигается за счет получения однородной и мелкозернистой структуры. При этом можно снизить скорость движения поршня и уменьшить эрозию пресс-формы. Благодаря отсутствию газовой пористости возможно проводить ТО отливок без риска образования раковин.

Композиционное литье предоставляет широкие возможности получения необходимых эксплуатационных свойств из различных комбинаций составляющих. При этом для формирования качественных отливок решающими являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами [17]. В подавляющем большинстве случаев это диффузионные взаимодействия, определяемые дефектами кристаллической структуры [18]. Контактная зона должна быть однородной и управляемой по геометрическим параметрам и свойствам, где протекают сложные физико-химические процессы при нестационарном тепловом режиме. Эта стадия является наименее прогнозируемой из-за наличия граничных, температурных и геометрических барьеров.

Для получения композиционных отливок с заданной структурой поверхностного слоя и гладкой поверхностью (корпуса гидрораспределителей, клапанные плиты, вставки пресс-форм литья под давлением и др.) применяли композицию из пористых металлокерамических оболочек (ПМКО), объединенных заливкой в форму жидкого чугуна [19]. Наиболее сложным является этап формирования переходной зоны между ПМКО и жидким металлом. Необходимое условие заполнения пор металлокерамики – прогрев оболочки до 0,8–1,0 температуры кристаллизации расплава, что можно получить за счет

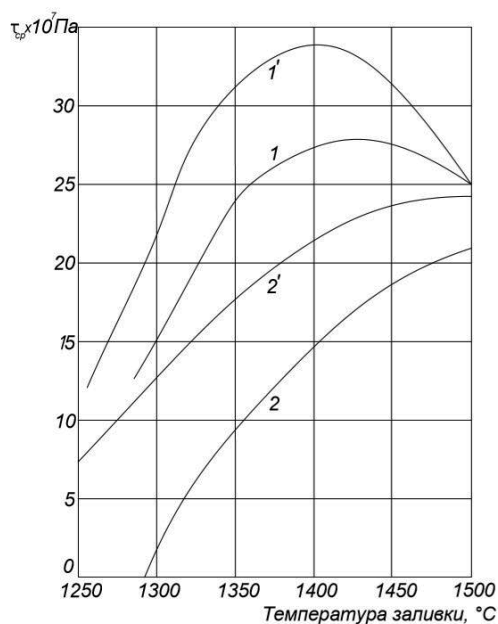


Рис. 2. Влияние температуры заливки на прочность соединения ПМКО с чугуном при соотношении R/r : 1 – 10, 2 – 2 (без TiCN); 1' – 10; 2' – 2 (в присутствии TiCN)



Рис. 3. Структура переходной зоны ПМКО – матрица

перегрева чугуна, температуры заливки, прогрева литейной формы перед заливкой, перепуска металла, увеличения соотношения R/r (R – толщина слоя расплава, r – толщина металлокерамики). Перечисленные технологические мероприятия усложняют и удорожают процесс, повышают брак литья.

Для стабилизации режимов консолидации переходной зоны было проведено наномодифицирование чугуна карбонитридом титана (TiCN) в количестве 0,03% от массы чугуна. Прочность соединения керамики с матричным металлом возросла на 20 % (рис. 2). Наиболее высокие показатели прочности получены при температуре заливки 1400 °C (кривая 1', $R/r = 10$). Отмечены низкая чувствительность чугуна к колебаниям химического состава и продолжительность модифицирующего эффекта при выдержке металла в ковше.

Изменение структуры металла показано на рис. 3. Состав ПМКО – смесь порошков, соответствующая химическому составу мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5Т, матрица – серый чугун СЧ21-40.

Выводы

Наноразмерные частицы ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), введенные в расплав, позволяют получать отливки с однородной мелкозернистой структурой в различных сечениях. Это справедливо для всех сплавов литейного производства. Отличительной особенностью наномодифицирования является одновременный рост прочностных, пластических и служебных свойств сплавов.

Модифицирование в присутствии наночастиц приводит не только к видоизменению структуры металла, но и сопровождается снижением содержания газов, удалением неметаллических включений, десульфурацией и дефосфорацией, раскислением. Использование наноматериалов при изготовлении композиционных отливок дает возможность повысить устойчивость технологических процессов, обеспечить эксплуатационную надежность литых деталей.

Расширяются производственные возможности изготовления нанопорошков различными способами. Проводятся исследовательские работы по изучению свойств наночастиц, что способствует более широкому внедрению их в производство.

Для решения проблем и возможностей, связанных с нанотехнологией, необходима широкая пропаганда перспектив применения наноматериалов; государственная поддержка научно-исследовательских работ в этом направлении; организация промышленного производства, разработка методов и аппаратуры для получения и изучения наноматериалов; включение дисциплины «Нанотехнологии» в учебные планы соответствующих специальностей; подготовка аспирантов, кандидатов, докторов наук по специальности «Нанотехнологии»; изучение литейных свойств сплавов в присутствии наноразмерных материалов: изменение температур ликвидус и солидус, усадка сплавов, жидкотекучесть, трещинообразование, теплофизические характеристики сплавов, процессы кристаллизации и затвердевания и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудской А. И. Нанотехнологии в металлургии. С.-Петербург: Наука, 2007. 186 с.
2. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. М.: Металлургиздат, 1948. 766 с.
3. Гуляев Б. Б. Синтез сплавов. М.: Металлургия, 1984. 160 с.
4. Роко М. К., Уильямс Р. С., Аливисатос П. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. М.: Мир, 2002. 292 с.
5. Концепция управления формообразованием отливок / Сост. Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, И. В. Прокопович. Одесса: Экология, 2019. 272 с.
6. Верховлюк А. М., Щерецький О. А., Сергієнко Р. А., Каниболоцький Д. С., Афанасьєв М. В. Особливості взаємодії нанопорошків з металічними розплавами. Литво-2018: матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2018. С. 49–51.
7. Щерецький В. О., Щерецький О. А., Затуловський А. С. Дослідження міжфазної взаємодії нанодисперсних порошків із сплавами на основі міді. Литво-2018: матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2018. С. 190–191.
8. Давыдов С. В. Фуллереновая природа жидкого чугуна – основа технологии наномодифицирования // Черные и цветные сплавы. Новосибирск, 2005. С. 101–108.
9. Афтанділянц Є. Г., Лопатько К. Г., Щерецький А. А. Закономірності фазових перетворень алюмінієвих наночастинок. Литьє-2016: матеріали XII междунар. науч.-практ. конф., г. Запорожье, 2016. С. 20–22.
10. Кондратюк С. Є., Пархомчук Ж. В. Ефективність використання нанокристалічних матеріалів для модифікування сталей. Литво, металургія. 2017: Матеріали XIII міжнар. науч.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2017. С. 135–136.
11. Трегубенко Г. Н., Поляков Г. А., Бубликов Ю. А., Пучиков А. В., Дидович Е. И. Усовершенствование технологии выплавки литых феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением. Литьє-2015. Матеріали XI международной науч.-практ. конф., г. Запорожье, 2015. С. 416–417.
12. Федосеев С. Н. Повышение надежности стрелочных переводов с помощью модифицирования. Литьє-2015. Матеріали XI междунар. науч.-практ. конф., г. Запорожье, 2015. С. 423–425.
13. Кривошеев В. А., Калинин В. Т., Меньяло Е. В., Хрычиков В. Е., Доценко Ю. В., Тысячник В. А. Повышение эксплуатационной стойкости литых деталей двигателей и промышленных агрегатов. Литво-2018: матеріали XIV міжнар. науч.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2018. С. 123–124.
14. Сусло Н. В., Панченко А. Н. Исследование наномодификаторов при производстве чугуновых мелющих шаров. Литьє-2015. Матеріали XI междунар. науч.-практ. конф., г. Запорожье, 2015. С. 222–224.
15. Дудников О. С. и др. Разработка методов модифицирования никелевого сплава нанодисперсными композициями. – Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах. Литво-2018: збірник тез XIV міжнар. науч.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2018. С. 104–106.
16. Доценко Ю. В. та ін. Вплив модифікування та тиску на механічні властивості вилівка із сплавом АК7. Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах Литво-2018: збірник тез. XIV міжнар. науч.-практ. конф., м. Запоріжжя, 2018. С. 96–97.
17. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Воронова О. И. Композиционное литье – средство повышения эксплуатационной надежности литых деталей // Металл и литье Украины. 2017. № 8-1. С. 43–47.
18. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978, 248 с.
19. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Волянская К. В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем // Металл и литье Украины. 2016. № 4. С. 36–40.

REFERENCES

1. Rudskoj A. I. *Nanotehnologii v metallurgii* [Nanotechnology in metallurgy]. Saint Petersburg, Nauka Publ, 2007, 186 p.
2. Nehendzi Ju. A. *Stal'noe lit'e* [Steel casting]. Moscow, Metallurg Publ., 1948, 766 p.
3. Guljaev B. B. *Sintez splavov* [Synthesis of alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1984, 160 p.
4. Roko M. K., Uil'jams R. S., Alivisatos P. *Nanotehnologija v blizhajshem desjatiletii* [Nanotechnology in the next decade]. Moscow, Mir Publ., 2002, 292 p.
5. Lysenko T. V., Jasjukov V. V., Prokopovich I. V. *Konceptija upravlenija formoobrazovaniem otlivok: monografija* [Concept of castings shaping control: monography]. Odessa, Jekologija Publ., 2019, 272 p.
6. Verhovljuk A. M., Shherec'kij O. A., Sergienko R. A., Kaniboloc'kij D. S., Afanas'ev M. V. Osoblivosti vzaemodii nanoporoshkiv z metalichnimi rozplavami [Features of interaction of nanopowders with metal melts]. *Litvo – 2018: materialy XIV mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2018: materials of the XIV international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2018, pp. 49–51.
7. Shherec'kij V. O., Shherec'kij O. A., Zatulovs'kij A. S. Doslidzhennja mizhfaznoi vzaemodii nanodispersnih poroshkiv iz splavami na osnovi midi [The study of interfacial interaction of nano-dispersed powders from alloys based on copper]. *Litvo-2018: materialy XIV mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2018: materials of the XIV international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2018, pp. 190–191.
8. Davydov S. V. Fullerenovaja priroda zhidkogo chuguna – osnova tehnologii nanomodifirovanija [The fullerene nature of liquid cast iron is the basis of nanomodification technology]. *Trudy sed'mogo sezda litejshhikov Rossii / T1. Obshhie voprosy. Chernye i cvetnye splavy* [Proc. 7th Congress of foundries of Russia / T. 1. General issue. Black and non-ferrous alloys]. Novosibirsk, 2005, pp. 101–108.
9. Aftandiljanc E. G., Lopat'ko K. G., Shherec'kij A. A. Zakonomirnosti fazovih peretvoren' aljuminievih nanochastinok [Regularities of phase transformations of aluminum nanoparticles]. *Litvo-2016: materialy XII mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2016: materials of the XII international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2016, pp. 20–22.
10. Kondratjuk S. E., Parhomchuk Zh. V. Efektivnist' vikoristannja nanokristalichnih materialiv dlja modifikuvannja stalej [Efficiency of use of nanocrystalline materials for modification of steels]. *Litvo, metalurgija. 2017: Materialy XIII mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting, metallurgy. 2017: materials of the XIII international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2017, pp. 135–136.
11. Tregubenko G. N., Poljakov G. A., Bublikov Ju. A., Puchikov A. V., Didovich E. I. Usovershenstvovanie tehnologii vyplavki lityh ferrito-perlitnyh stalej s karbonitridnym uprochneniem [Improvement of technology of smelting of cast ferrite-perlite steels with

- carbonitride hardening]. *Litvo-2015: materiali XI mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2015: materials of the XI international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2015, pp. 416–417.
12. **Fedoseev S. N.** Povyshenie nadezhnosti strelochnykh perevodov s pomoshh'ju modifitsirovaniya [Improving the reliability of switches by modifying]. *Litvo-2015: materiali XI mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2015: materials of the XI international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2015, pp. 423–425.
13. **Krivosheev V. A., Kalinin V. T., Menjajlo E. V., Hrychikov V. E., Docenko Ju. V., Tysjachnik V. A.** Povyshenie jekspluatatsionnoy stojkosti litykh detalej dvigatelej i promyshlennykh agregatov [Increase of operational stability of cast parts of engines and industrial units]. *Litvo-2018: materiali XIV mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2018: materials of the XIV international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2018, pp. 123–124.
14. **Suslo N. V., Panchenko A. N.** Issledovanie nanomodifikatorov pri proizvodstve chugunnykh meljushhih sharov [Research of nanomodifiers in the production of cast iron grinding balls]. *Litvo-2015: materiali XI mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2015: materials of the XI international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2015, pp. 222–224.
15. **Dudnikov O. S.** Razrabotka metodov modifitsirovaniya nikelovogo splava nanodispersnyimi kompozicijami [Development of methods for modification of Nickel alloy in nanoparticulate compositions]. *Litvo-2018: materiali XIV mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2018: materials of the XIV international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2018, pp. 104–106.
16. **Docenko Ju. V.** Vpliv modifikuvannja ta tisku na mehanichni vlastivosti vilivka iz splavu AK7 [Influence of modification and pressure on mechanical properties of AK7 alloy casting]. *Litvo-2018: materiali XIV mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf.* [Casting-2018: materials of the XIV international scientific and practical conference]. Zaporozhye, 2018, pp. 96–97.
17. **Jasjukov V. V., Lysenko T. V., Voronova O. I.** Kompozicionne lit'e – sredstvo povyshenija jekspluatatsionnoy nadezhnosti litykh detalej [Composite casting—a means of improving the operational reliability of cast parts]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2017, no. 8-1, pp. 43–47.
18. **Bokshtejn B. S.** *Diffuzija v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 248 p.
19. **Jasjukov V. V., Lysenko T. V., Voljanskaja K. V.** Kompozicionnye otlivki s reguliruemym poverhnostnym sloem [Composite castings with adjustable surface layer]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2016, no. 4, pp. 36–40.