

УДК 669-1:539.8:544.4

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСПАДА АУСТЕНИТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

ТРОЦАН А. И.<sup>1</sup>, д.т.н. проф.,  
КАВЕРИНСКИЙ В. В.<sup>2</sup>, к.т.н.,  
БАГЛЮК Г. А.<sup>3</sup>, д.т.н., проф.,  
СУХЕНКО З. П.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> отдел износостойких и коррозионностойких порошковых конструкционных материалов, Институт проблем материаловедения НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, 03680, Киев, Украина, тел. 0-50-65-63-604, e-mail: [don1945@ukr.net](mailto:don1945@ukr.net)

<sup>2</sup> отдел износостойких и коррозионностойких порошковых конструкционных материалов, Институт проблем материаловедения НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, 03680, Киев, Украина, тел. 0-50-21-21-724, e-mail: [hisie@ukr.net](mailto:hisie@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-6940-579X

<sup>3</sup> отдел износостойких и коррозионностойких порошковых конструкционных материалов, Институт проблем материаловедения НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, 03680, Киев, Украина, тел. 0-67-23-52-816, e-mail: [gbag@rambler.ru](mailto:gbag@rambler.ru)

<sup>4</sup> отдел износостойких и коррозионностойких порошковых конструкционных материалов, Институт проблем материаловедения НАН Украины, ул. Кржижановского, 3, 03680, Киев, Украина, тел. 0-50-91-88-113, e-mail: [hisie@ukr.net](mailto:hisie@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8578-5473

**Аннотация.** *Цель.* Исследование влияния высокотемпературной деформации низкоуглеродистой стали на кинетику распада аустенита и формирование структуры при различных скоростях охлаждения при помощи компьютерного моделирования. *Методика.* Основным инструментом исследования является физически обоснованная компьютерная модель, описывающая кинетику распада аустенита в сталях в процессе охлаждения. В качестве материала исследования выбрана низкоуглеродистая сталь 15. *Результаты.* Смоделирован процесс, описывающий кинетику распада аустенита в сталях произвольного состава, что позволяет также качественно и количественно предсказать формирование структуры металла. На примере низкоуглеродистой низколегированной стали продемонстрирована возможность модели прогнозировать влияние предварительной высокотемпературной деформации на структурообразование стали в ходе фазовых превращений. Показано, что увеличение скорости ферритного превращения в деформированной стали приводит к измельчению зерна феррита и предотвращению образования низкоуглеродистого мартенсита в конечной структуре. *Научная новизна.* С использованием компьютерной модели установлены качественные и количественные характеристики влияния предварительной деформации аустенита при 930 °С в стали 15. Установлено, что предварительная деформация со степенью 50 % в 1,5 – 2,0 (в зависимости от интенсивности охлаждения) раза измельчает размер зерна феррита и предотвращает образование низкоуглеродистого мартенсита. Степень выраженности влияния предварительной деформации на кинетику распада аустенита уменьшается при снижении скорости охлаждения. *Практическая значимость.* Компьютерное моделирование процессов распада переохлажденного аустенита позволяет быстро и с минимальными затратами получить информацию, необходимую для разработки и усовершенствования технологий термической и термомеханической обработки. В частности, показано, что, если образование мартенситных и бейнитных структур в условиях ускоренного охлаждения нежелательно, предварительная деформация низкоуглеродистой низколегированной стали при температуре несколько выше  $A_3$  позволяет существенно снизить их количество при одновременном значительном (в 1,5 – 2,0 раза) измельчении зерна феррита.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, фазовые превращения, аустенит, сталь, деформация

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ РОЗПАДУ АУСТЕНІТУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЇ

ТРОЦАН А. І.<sup>1</sup>, д.т.н. проф.,  
КАВЕРИНСКИЙ В. В.<sup>2</sup>, к.т.н.,  
БАГЛЮК Г. А.<sup>3</sup>, д.т.н., проф.,  
СУХЕНКО З. П.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> відділ зносостійких і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна, тел. 0-50-65-63-604, e-mail: [don1945@ukr.net](mailto:don1945@ukr.net)

<sup>2</sup> відділ зносостійких і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна, тел. 0-50-21-21-724, e-mail: hisie@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6940-579X

<sup>3</sup> відділ зносостійких і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна, тел. 0-67-23-52-816, e-mail: gbag@rambler.ru

<sup>4</sup> відділ зносостійких і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Кржижанівського, 3, 03680, Київ, Україна, тел. 0-50-91-88-113, e-mail: hisie@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8578-5473

**Анотація. Мета.** Дослідження впливу високотемпературної деформації низьковуглецевої сталі на кінетику розпаду аустеніту і формування структури при різних швидкостях охолодження за допомогою комп'ютерного моделювання. **Методика.** Основним інструментом дослідження є фізично обґрунтована комп'ютерна модель, що описує кінетику розпаду аустеніту в сталях в процесі охолодження. Як матеріал дослідження обрано низьковуглецеву сталь 15. **Результати.** Змодельовано процес, що описує кінетику розпаду аустеніту в сталях довільного складу, що дозволяє також якісно і кількісно передбачити формування структури металу. На прикладі низьковуглецевої низьколегованої сталі продемонстрована можливість моделі прогнозувати вплив попередньої високотемпературної деформації на структуроутворення сталі в ході фазових перетворень. Показано, що збільшення швидкості феритного перетворення в деформованій сталі призводить до подрібнення зерна фериту і запобігання утворенню низьковуглецевого мартенситу в кінцевій структурі. **Наукова новизна.** З використанням комп'ютерної моделі встановлені якісні та кількісні характеристики впливу попередньої деформації аустеніту при 930 °C у сталі 15. Встановлено, що попередня деформація зі ступенем 50% у 1,5 – 2,0 (в залежності від інтенсивності охолодження) рази подрібнює розмір зерна фериту і запобігає утворенню низьковуглецевого мартенситу. Ступінь вираженості впливу попередньої деформації на кінетику розпаду аустеніту зменшується при зниженні швидкості охолодження. **Практична значимість.** Комп'ютерне моделювання процесів розпаду переохолодженого аустеніту дозволяє швидко і з мінімальними витратами отримати інформацію, необхідну для розробки та вдосконалення технологій термічної і термомеханічної обробки. Зокрема показано, що, коли утворення мартенситних і бейнітних структур в умовах прискореного охолодження є небажаним, попередня деформація низьковуглецевої низьколегованої сталі при температурі трохи вище  $A_3$  дозволяє істотно знизити їх кількість при одночасному значному (в 1,5 – 2,0 рази) подрібненні зерна фериту.

*Ключові слова:* математичне моделювання, фазові перетворення, аустеніт, сталь, деформація

## MATHEMATICAL MODELING OF AUSTENITE TRANSFORMATION KINETICS DURING COOLING OF LOWCARBON STEEL CONSIDERING THE EFFECT OF STRAIN

TROTSAN A. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof*  
KAVERINSKY V. V.<sup>2</sup>, *Ph.D.*,  
BAGLYUK G. A.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof*,  
SUKHENKO Z. P.<sup>4</sup>

**Annotation. Purpose.** A study of high-temperature deformation of low-carbon steel impact on the kinetics of austenite transformations and a structure formation at different cooling rates using computer simulation. **Methods.** The main research tool is a physically based computer model describing the kinetics of austenite transformation in steel during cooling. As research material selected low-carbon steel 15. **Findings.** Here was modeled a process, describing the transformation kinetics of austenite in arbitrary composition steels, allowing also qualitatively and quantitatively predict the metal structure formation. Using as an example a low-carbon low-alloyed steel the feasibility of the model to predict the impact of pre-high-temperature deformation on the steel structure during the phase transformation was demonstrated. It was shown an increasing of ferrite transformation rate in the deformed steel which causes ferrite grain refinement and prevent a formation of low-carbon martensite in the final structure. **Originality.** Using a computer model quality and quantity effects austenite of pre-strain at 930 °C in the steel 15 were studied. It is found that pre-deformation with a degree of 50% can in the 1.5 - 2.0 (depending on the cooling rate) times refines ferrite grain size and prevents the formation of low-carbon martensite. The degree of pre-deformation effect on the kinetics of austenite transformation decreases with a decrease in the cooling rate. **Practical value.** Computer simulation of supercooled austenite transformation processes allows you to quickly and cost-effectively get the information necessary for thermal and thermo-mechanical processing technologies development and improvement. In particular it is shown that when the formation of martensite and bainite structures in the conditions of accelerated cooling is not desirable, preliminary deformation of a low carbon low alloyed steel at a temperature slightly higher than  $A_3$  can significantly reduce their quantity while significantly (up to 1.5 – 2.0 times) ferrite grains refinement.

Keywords: mathematical modeling, phase transformations, austenite steel, deformation

## Введение

В формировании структуры и свойств сталей значительную роль играют фазовые превращения, среди которых одно из наиболее значимых мест занимают процессы распада аустенита при охлаждении металла [3, 6, 7]. Их экспериментальному [7, 8, 10] и теоретическому [1, 3, 5, 9, 6] изучению посвящено немало работ, рассматривающих как термодинамику [1, 3] (равновесные состояния) так и кинетику [2, 5, 6, 9] данных явлений.

Задачей, стоявшей перед нами, являлось создание компьютерной модели, способной описать кинетику всего комплекса процессов, происходящих при распаде переохлаждённого аустенита. Разработанная модель [4] позволяет рассчитать в едином процессе ферритное, перлитное, бейнитное и мартенситное превращения, а также предсказать количественные характеристики конечной структуры металла. Модель учитывает влияние на термодинамику и кинетику фазовых превращений таких факторов как химический состав (до 6 одновременно присутствующих компонентов), размер исходного зерна аустенита, степень и температуру предварительной деформации металла в аустенитной области.

Одним из важных факторов при разработке режимов деформационно-термической обработки стали является влияние деформации на кинетику распада аустенита [5 – 7]. В то же время эти данные (особенно количественные и для данного конкретного состава) могут быть мало представленными в доступной литературе. Проведение экспериментальных исследований подобного рода является длительным, трудоёмким и дорогостоящим процессом. Компьютерное моделирование, хотя и не является полной альтернативой натурному эксперименту, даёт возможность быстро и с минимальными затратами получить необходимые данные для заданной стали [1, 2].

Факт наличия влияния деформации на кинетику фазовых превращений известен [6, 10]. В то же время качественные и количественные характеристики такого влияния не столь однозначны. Так, например, известно, что деформация может способствовать мартенситному и бейнитному превращениям [7, 10]. Подобное утверждение будет справедливо, если деформация происходит при температурах, ниже возможного начала таких превращений или если сталь не склонна или мало склонна к развитию в ней процесса распада аустенита (например, высокомарганцовистые высокоуглеродистые аустенитные стали). Наличие высокотемпературной деформации (изучению влияния которой и посвящена данная работа) в низколегированной стали ускоряет процесс ферритного превращения, что обусловлено развитием дефектности структуры аустенита и формированием субзёрен. Таким

образом, наличие высокотемпературной деформации аустенита может привести к формированию большего количества продуктов диффузионных превращений и снизить долю продуктов сдвиговых превращений.

## Цель

Исследование влияния высокотемпературной деформации низкоуглеродистой стали на кинетику распада аустенита и формирование структуры при различных скоростях охлаждения с помощью компьютерного моделирования.

## Материал

Исследования кинетики распада аустенита при помощи компьютерной модели проводились на примере стали 15, состав которой приведен в таблице 1.

Размер исходного зерна аустенита задавался 60 мкм. Рассмотрены степени деформации 0 и 50 %. Температура деформации принималась равной 930 °С, то есть несколько выше точки  $A_3$ , которая, согласно термодинамическим расчётам составляет для данного состава 894 °С. Точка  $A_1$  согласно этим расчётам равна 727 °С.

Таблица 1

Состав стали, принятый в расчётах по модели, масс. % /

Steel composition in simulations, wt. %

C	Mn	Si
0,15	0,50	0,25

Термодинамическое и кинетическое моделирование проводилось с использованием разработанной нами специальной компьютерной программы [4].

## Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 приведены расчётные кинетические кривые распада аустенита в стали данного состава (таблица 1) для скорости охлаждения 100 °С/с. Такая скорость охлаждения характерна для процессов закалки и при ней даже в стали подобного состава возможно образование некоторого количества мартенсита.

Из графиков рис. 1 видно, что влияние предварительной деформации на кинетику распада аустенита существенно. Деформация практически не смещает температуру фактического начала ферритного превращения, но существенно ускоряет его. Так, в обоих случаях  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение стартует примерно при 785 °С. Без деформации доля феррита в конечной структуре составляет примерно 42,5 %. При этом глобулярный феррит, образующийся при температурах выше 645 °С составляет около 17 %. Остальной феррит, зарождающийся ниже температуры, при которой возможно протекание

бейнитного превращения, будет иметь ацикулярную (игольчатую) структуру [2].

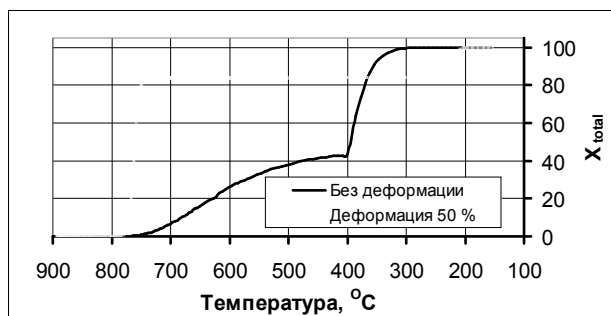


Рис. 1 – Результаты компьютерного моделирования влияния предварительной деформации на кинетику распада аустенита в стали 15 (скорость охлаждения 50 °C/c) /

The results of computer simulation of pre-deformation effect on the kinetics of austenite transformation in steel 15 (cooling rate 50 °C/s)

При температурах ниже 400 °C происходит мартенситное превращение, которое полностью завершается при 280 °C. Ускорение ферритного превращения в предварительно деформированном аустените приводит к тому, что большая часть аустенита успевает превратиться в феррит уже при достижении 720 °C. После этого начинается перлитное превращение, которое однако происходит не столь быстро и перлита в конечной структуре очень мало (всего ~0,3 %). Доля глобулярного [2] феррита в этом случае почти 84 %. Температура начала мартенситного превращения сильно смещается вниз из-за обогащения углеродом аустенита при протекании ферритного превращения. Температура его начала составит 230 °C, а завершится оно при 190 °C.

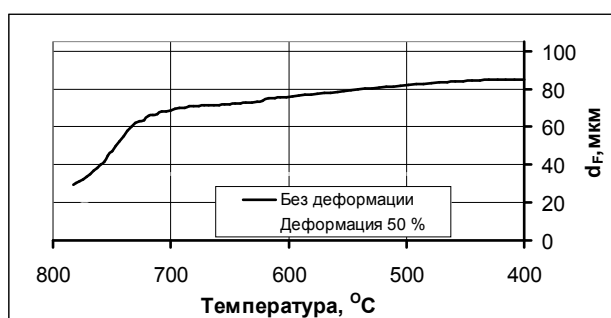


Рис. 2 – Результаты компьютерного моделирования влияния предварительной деформации на изменение среднего размера зерна феррита в ходе распада аустенита в стали 15 (скорость охлаждения 100 °C/c) /

The results of computer simulation of pre-deformation effect on ferrite grain size change during austenite transformation in steel 15 (cooling rate 100 °C/s)

На рисунке 2 приведены результаты моделирования изменения средних размеров зерна феррита в ходе превращения. На приведенных графиках отсечена область инкубационного периода, когда феррита ещё крайне мало (менее 10<sup>-5</sup> %). В этот период не исключается формирование и рост некоторого количества зёрен феррита, но вероятность их появления, а, следовательно, и количество, крайне малы.

Из приведенных результатов (рис.2) видно, что зарождение феррита в предварительно деформированной стали идёт гораздо быстрее и, соответственно, конечная структура оказывается значительно более мелкозернистой, а размер зерна практически стабилизируется к моменту окончания превращения. В недеформированном образце зарождение идёт медленнее, ферритное превращение не успевает завершиться к началу мартенситного. Зёрна феррита продолжают расти за счёт превращения. Для коагуляционного роста времени недостаточно в обоих случаях.

Таким образом, предварительная деформация не только препятствует некоторому подкаливанию низкоуглеродистой низколегированной стали при ускоренном охлаждении, но и способствует формированию более дисперсной структуры феррита.

На рис. 3 показаны результаты влияния аналогичной предварительной деформации для той же стали, но при скорости охлаждения 10 °C/c, из которых видно, что при меньшей скорости охлаждения влияние деформации менее выражено.

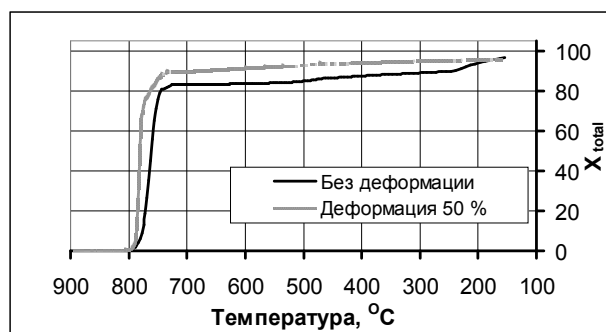


Рис. 3 – Результаты компьютерного моделирования влияния предварительной деформации на кинетику распада аустенита в стали 15 (скорость охлаждения 10 °C/c) /

The results of computer simulation of pre-deformation effect on the kinetics of austenite transformation in steel 15 (cooling rate 10 °C/s)

Тем не менее можно отметить сохранение тенденции ускорения ферритного превращения и препятствование образованию мартенсита. Также предсказано и значительное измельчение ферритного зерна при предварительной деформации от более 90 мкм в недеформированной стали до 60 мкм в предварительно деформированной.

Как в недеформированном, так и предварительно деформированном металле ферритное превращение завершается при близких значениях температуры, примерно при 715 °С. Кривая (рис.3), соответствующая предварительно деформированной стали более крутая, то есть на начальных и средних стадиях превращение идёт быстрее. Количество перлита в конечной структуре при наличии деформации возрастает от 2,2 в недеформированном до 4,0 % в деформированном, но остаётся небольшим. Количество бейнита, напротив, снижается от 4,2 до 2,1 %. В недеформированном образце предсказывалось образование около 7 % мартенсита; в деформированном его образование не предполагается.

Таким образом, с помощью разработанной авторами компьютерной модели [4] смоделирован процесс кинетики распада аустенита в сталях произвольного состава, позволяющий качественно и количественно предсказать формирование структуры металла. На примере низкоуглеродистой стали продемонстрированы возможности модели описать влияние предварительной деформации на структурообразование стали в ходе фазовых превращений. Показано увеличение скорости ферритного превращения в деформированной стали, приводящее к измельчению зерна феррита и предотвращению образования низкоуглеродистого мартенсита в конечной структуре.

#### Научная новизна и практическая ценность

С использованием компьютерной модели установлены качественные и количественные

характеристики влияния предварительной деформации аустенита при 930 °С в стали 15. Показано, что предварительная деформация со степенью 50 % позволяет в 1,5 – 2,0 раза (в зависимости от интенсивности охлаждения) измельчить размер зерна феррита и предотвратить образование низкоуглеродистого мартенсита. Степень выраженности влияния предварительной деформации на кинетику распада аустенита уменьшается при снижении скорости охлаждения.

#### Выводы

1. Показаны возможности разработанной компьютерной модели для определения качественных и количественных параметров процессов распада аустенита и структурообразования при различных скоростях охлаждения, с учётом предварительной деформации.

2. Методом компьютерного моделирования показана возможность существенного ускорения ферритного превращения при наличии предварительной высокотемпературной деформации аустенита, способствующей более быстрому его завершению, измельчению зерна феррита в 1,5 – 2,0 раза и подавлению мартенситного превращения.

3. Показано уменьшение степени выраженности влияния предварительной деформации на кинетику распада аустенита при снижении скорости охлаждения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голод В. М. Вычислительная термодинамика в материаловедении [Текст] / В. М. Голод, К. Д. Савельев. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – 217 с.
2. Голиков П. А. Расчёт коэффициента диффузии углерода в сталях и его приложение в моделировании фазовых превращений и науглероживания [Текст]: дис. канд. тех. наук / П. А. Голиков. – Санкт-Петербург, 2011. – 176 с.
3. Компьютерное моделирование фазовых превращений в комплексно легированной стали [Текст] / А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий, З. П. Сухенко // Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения 2016. – Днепропетровск: ПГСА, 2016. – Вып. 89. – С. 177 – 181.
4. Каверинский В. В. Комп'ютерна програма для моделювання фазових перетворень. – Свідectво про реєстрацію авторського права № 70573 від 22.02.2017.
5. Моделирование  $\gamma \rightarrow \alpha$  - превращения в сталях [Текст] А. А. Васильев, Д. Ф. Соколов, Н. Г. Колбасников, С. Ф. Соколов // Физика твёрдого тела. – 2012. – Т. 54. – Вып. 8. – С. 1565 – 1574.
6. Моделирование влияния состава трубных сталей и режима термической обработки на кинетику распада аустенита и структуру феррита [Текст] / Н. Ю. Золоторевский, Е. В. Нестерова, Е. И. Хлусова и др. // Вопросы материаловедения. – 2011. - № 3. – С. 38 – 52.
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels / H.K.D.H. Bhadeshia // The Institute of Materials: London, UK. – 1992. – 468 p.
8. Influence of deformation on austenite to ferrite transformation in low carbon steels: experimental approach and modeling [Text] / S. Lacroix, Y. T. Breche, M. Veron e. a. // Austenite Formation and Decomposition. – Warrendale, PA, 2003. – P. 367 – 379.
9. Vasilyev A. Carbon diffusion coefficient in complexly alloyed austenite [Text] / A. Vasilyev // Detroit: Proc. MS&T, 2007. – P. 537 – 551.
10. Yoshie A. Formation of flow stress on Nb added steels by considering work-hardening and dynamic recovery [Text] / A. Yoshie // ISIJ Int. – 1996. – V. 36. – P. 467 – 473.

#### REFERENCES

1. Golod V. M. *Vychislitel'naja termodinamika v materialovedenii* [Computational Thermodynamics in Materials Engineering] / V. M. Golod, K. D. Savel'ev. – St. Petersburg: Publishing of the Polytechnic University, 2010. – 217 p. (in Russian)

2. Golikov P. A. *Raschjot koeficienta diffuzii ugljeroda v staljah i ego prilozhenie v modelirovanii fazovyh prevrashhenij i nauglerozhivaniya* [Calculation of carbon diffusion coefficient in steel and its application in modeling of phase transformations and carburizing]: Dis. cand. tehn. Science / P. A. Golikov. – St. Petersburg, 2011. - 176 p. (in Russian)
3. *Komp'juternoe modelirovanie fazovyh prevrashhenij v kompleksno legirovannoj stali* [Computer modeling of phase transformations in the complex alloy steel] / A. I. Trocan, V. V. Kaverinsky, I. L. Brodecky, Z. P. Suhenko // *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Starodubovskie chtenija 2016*. [Construction, materials science, mechanical engineering: Starodubov reading in 2016.] – Dnepropetrovsk: PGSA, 2016. - Vol. 89. – pp. 177 – 181. (in Russian)
4. Kaverinsky V. V. Computer program for modeling of phase transformations. – Certificate of copyright registration number 70573 from 02.22.2017.
5. *Modelirovanie  $\gamma \rightarrow \alpha$ -prevrashhenija v staljah* [Modeling of  $\gamma \rightarrow \alpha$ -transformations in steels] A. A. Vasil'ev, D. F. Sokolov, N. G. Kolbasnikov, S. F. Sokolov // *Fizika tvjordogo tela* [Solid State Physics]. – 2012. – V. 54. – Vol. 8. – pp. 1565 – 1574. (in Russian)
6. *Modelirovanie vlijaniya sostava trubnyh stalej i rezhima termicheskoj obrabotki na kinetiku raspada austenita i strukturu ferrita* [Modeling of the effect of pipe steels composition and heat treatment conditions on the kinetics of austenite decay and ferrite structure] / N. Ju. Zolotarevskij, E. V. Nesterova, E. I. Hlusova et. all. // *Voprosy materialovedenija* [Materials Questions]. – 2011. - № 3. – pp. 38 – 52. (in Russian)
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels / H.K.D.H. Bhadeshia // The Institute of Materials: London, UK. – 1992. – 468 p.
8. Influence of deformation on austenite to ferrite transformation in low carbon steels: experimental approach and modeling [Text] / S. Lacroix, Y. T. Breche, M. Veron e. a. // *Austenite Formation and Decomposition*. – Warrendale, PA, 2003. – P. 367 – 379.
9. Vasilyev A. Carbon diffusion coefficient in complexly alloyed austenite [Text] / A. Vasilyev // *Detroit: Proc. MS&T, 2007*. – P. 537 – 551.
10. Yoshie A. Formation of flow stress on Nb added steels by considering work-hardening and dynamic recovery [Text] / A. Yoshie // *ISIJ Int.* – 1996. – V. 36. – P. 467 – 473.

*Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)*