



УДК 621.62-4

## Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM Heat Treatment

А. А. Воробьев<sup>1</sup>, А. А. Крутько<sup>2</sup>, А. М. Бадамшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, Российская Федерация, 655050, Омск, Мира пр., 11

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Крутько А. А., Бадамшин А. М. Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM Heat Treatment // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 727–735. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-727-735

### Аннотация

**Цель:** Проведение обзора методики алгоритма добавления нового материала в базу данных модуля Qform Heat Treatment с последующей оценкой адекватности модели методом сравнения распределения ее микротвердости с экспериментальными данными. **Методы:** Разработана методика моделирования термической обработки (закалки) образцов из сталей 60 и 40X в программном модуле QFORM Heat Treatment. Приводится алгоритм добавления нового материала в базу данных программного комплекса с последующей оценкой адекватности построенной модели методом сравнения полученных данных распределения микротвердости по сечению при моделировании процесса в Qform и данных лабораторного эксперимента. **Результаты:** Модели распределения твердости по диаметральному сечению закаленных цилиндрических образцов из встроенной в базу данных QFORM Heat treatment стали 60 и адаптированной стали 40X. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными распределения твердости закаленных образцов. **Практическая значимость:** Полученные в настоящей работе результаты представляют алгоритм пополнения базы данных модуля Qform Heat Treatment, предназначенного для проведения операций термической обработки сталей и цветных сплавов. В процессе проведения эксперимента было установлено, что модель добавленного в базу данных материала обладает высокой степенью адекватности. Расширение базы данных материалов данного модуля позволит осуществлять его широкое применение в производствах, чья деятельность связана с термической обработкой.

**Ключевые слова:** Термическая обработка, компьютерное моделирование, Qform, закалка, микротвердость, доэвтектоидные стали.

В настоящее время наблюдается стремительный рост внедрения программных комплексов для моделирования технологических процессов машиностроения в производство [1–8]. Это связано с их эффективностью при разработке новых

технологических операций, поскольку адекватно построенные компьютерные модели позволяют в короткий срок провести многофакторный эксперимент и оценить изменение свойств исследуемого объекта [9, 10], что, в свою очередь, снижает

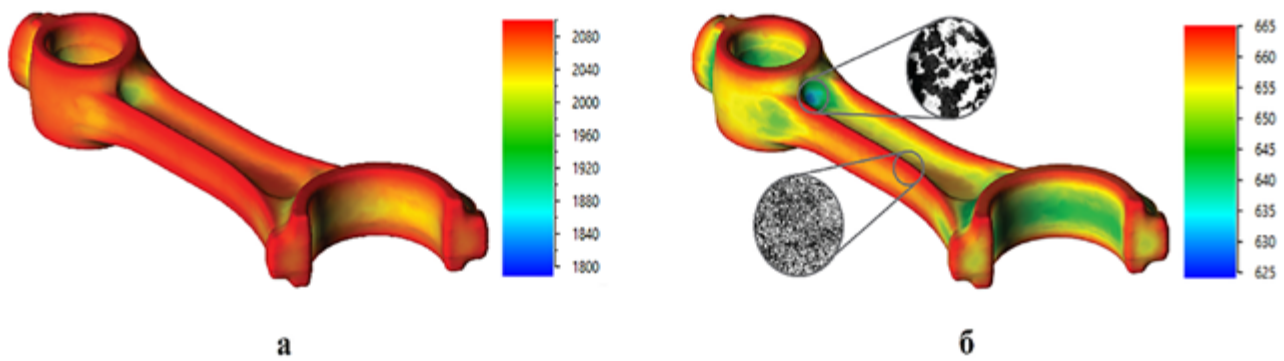


Рис. 1. Моделирование термической обработки в Qform:

*a* — распределение предела прочности (МПа);

*б* — распределение твердости по Виккерсу и оценка фазового состава

трудоемкость и длительность разработки новых технологий и их режимов.

В последних версиях программного комплекса QFORM, основное назначение которого заключается в моделировании операций обработки металлов давлением, появился новый модуль QForm Heat Treatment, позволяющий моделировать процессы термической обработки сталей и цветных сплавов [11]. Основные возможности данного комплекса заключаются в прогнозировании фазового состава и механических свойств термически обрабатываемых деталей (рис. 1).

Одним из существенных недостатков данного модуля является отсутствие встроенной широкой базы данных материалов термически обрабатываемых заготовок [12]. Несмотря на это, у пользователя имеется возможность самостоятельно пополнять данную базу методом изменения значений параметров встроенных материалов (физико-механические свойства фаз, кинетика фазовых превращений, равновесные объемные доли фаз, коэффициенты изменения объема при фазовых превращениях и т. д.). Целью настоящей работы является проведение обзора методики алгоритма добавления нового материала в базу данных модуля Qform Heat Treatment с последующей оценкой адекватности модели методом сравнения распределения ее микротвердости с экспериментальными данными.

С применением программного модуля Qform Heat Treatment проводилось моделирование процесса закалки для сталей 60 и 40X. Отсутствующий в базе данных материал — сталь 40X — был добавлен по представленной ниже методике. Температура нагрева под закалку составляла 850 °С для стали 40X и 800 °С для стали 60. Образцы имели цилиндрическую форму с диаметром  $d = 12$  мм и высотой  $h = 10$  мм. Для оценки адекватности модели проводилось сравнение распределения значений ее микротвердости по сечению с термически обработанными образцами в лабораторных условиях. Экспериментальные образцы имели идентичную геометрическую форму. Нагрев под закалку осуществлялся в термической печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11-М1. После проведения термической обработки, для оценки распределения микротвердости по глубине образцы подвергались резке по диаметральному сечению на портативном дисковом отрезном станке с подводом смазочно-охлаждающей жидкости. Исследование микротвердости проводилось на микротвердомере Shimadzu HNV-2 (рис. 2).

При определении значения микротвердости нагрузка на индентор составляла 400 грамм. Время выдержки при данной нагрузке — 8 секунд.

Рассмотрим алгоритм добавления нового материала в базу данных программы на примере



Рис. 2. Микротвердомер Shimadzu HMV-2

стали 40X и последующее проведение термической обработки (закалки).

После загрузки геометрии заготовки производится выбор материала. За основу был взят имеющийся в базе данных материал — сталь 60. После чего было произведено изменение химического состава на состав стали 40X (рис. 3).

По справочным данным [13, 14] были заданы физико-механические свойства фаз материала (рис. 4) и проведена адаптация модели фазовых переходов (рис. 5).

Следующим этапом после добавления нового материала является назначение режимов термической обработки. Температура нагрева под закалку составляла 850 °С, охлаждающая среда — вода [15]. Время выдержки в охлаждающей жидкости — 1 минута. Результаты распределения твердости по диаметральному сечению модели представлены на рис. 6.

Для оценки адекватности модели в ходе исследования была проведена закалка цилиндрических образцов из стали 40X. Микротвердость по сечению определялась методом Виккерса на микротвердомере Shimadzu HMV-2 при нагрузке 50 г. Сравнение экспериментального значения твердости и модели приведено на рис. 7.

Идентичное исследование проводилось для встроенного в базу данных материала — сталь 60. Экспериментальное и моделируемое значение микротвердости представлено на рис. 8.

Из полученных зависимостей видно: результаты моделирования и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Дальнейшее повышение качества модели возможно, в частности, при совершенствовании теплофизических характеристик, встроенных в программу охлаждающих сред для термической обработки.

Группа сплавов		3 - unalloyed quality steels with C >: <a href="#">Выбрать</a>	
Базовый элемент		Fe	
	мин	макс	=
C	0.36	0.44	
Si	0.17	0.37	
Mn	0.5	0.8	
P		0.035	
S		0.04	
Cu		0.3	
Cr		0.25	
Ni		0.3	

Свойства

Химический состав

Свойства фаз

Austenite

Сопротивление деформации

Плотность

Теплопроводность

Температурный коэф. расширения

Теплоемкость

Модуль Юнга

Коэф. Пуассона

Твердость

Предел прочности

Ferrite

Рис. 3. Добавление химического состава стали 40X в Qform

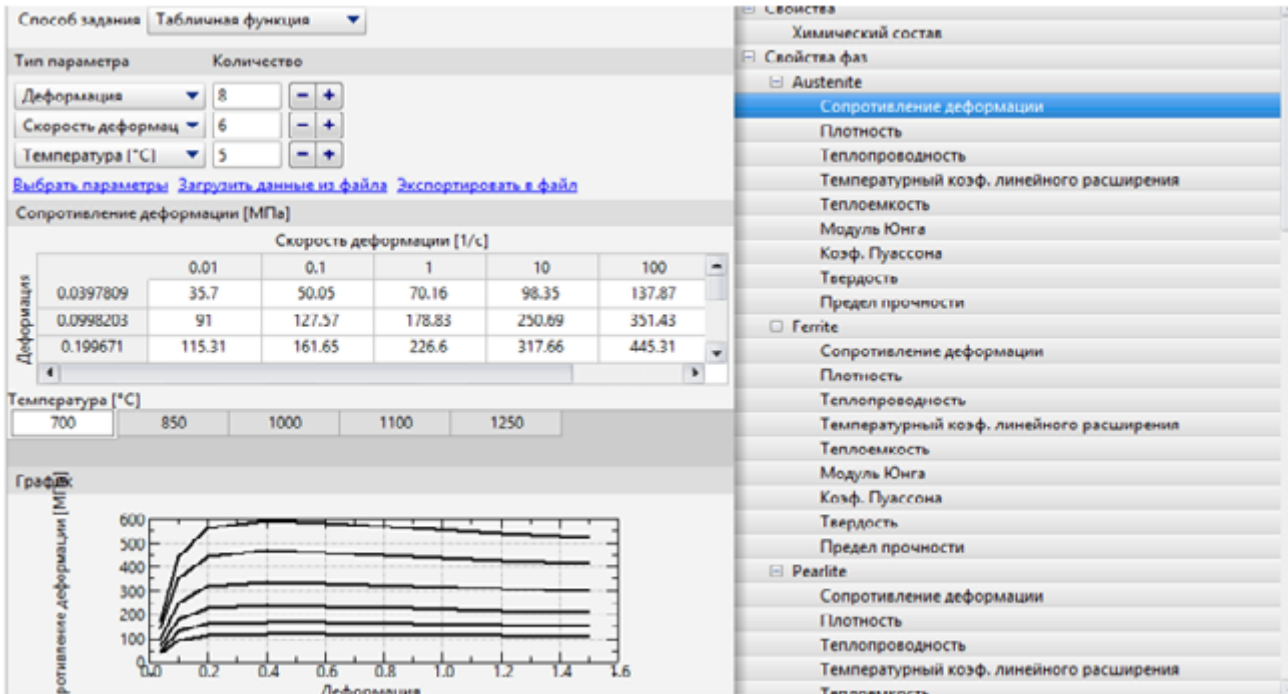


Рис. 4. Задание физико-механических свойств фаз стали 40X

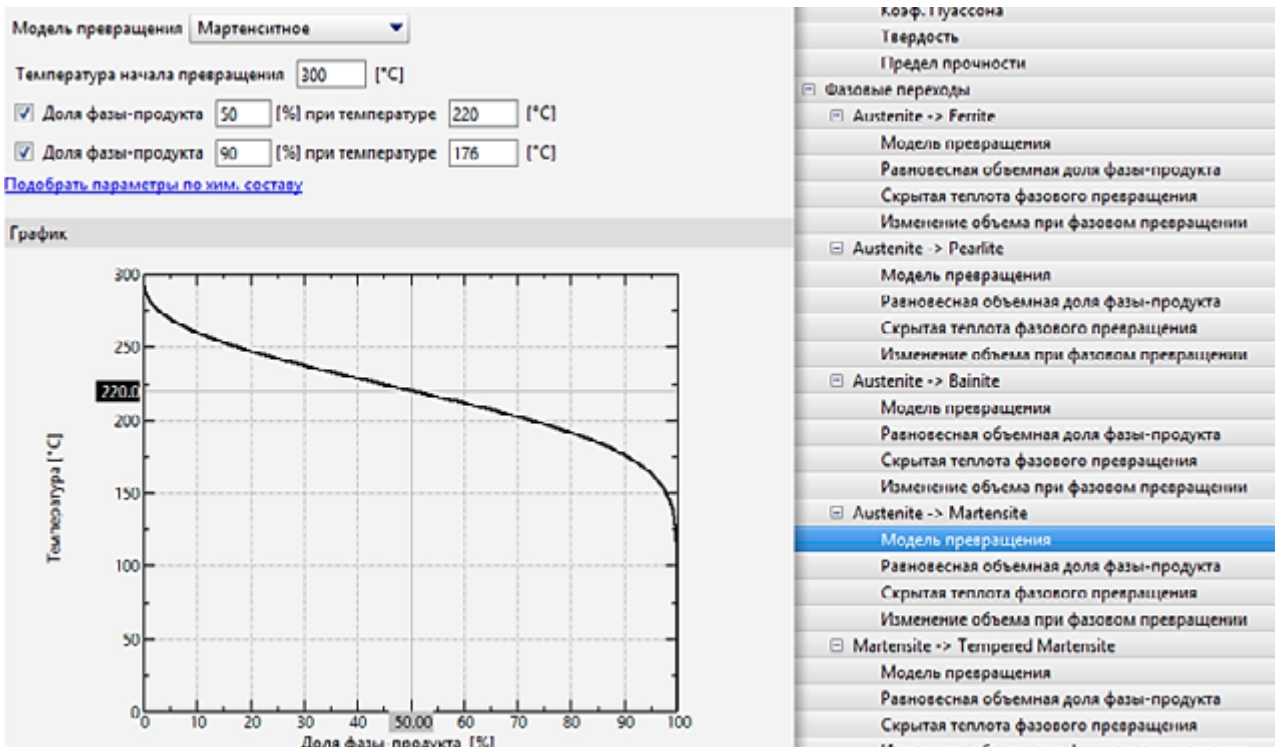


Рис. 5. Адаптация фазовых переходов под сталь 40X на примере модели мартенситного превращения

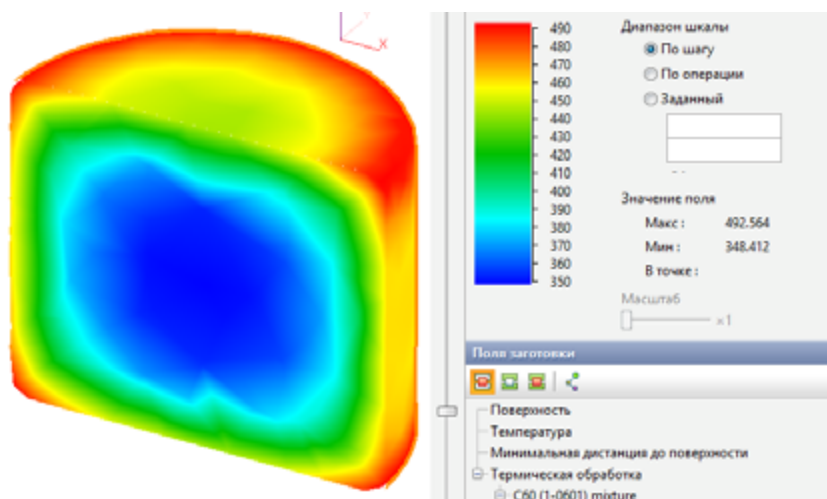


Рис. 6. Модель распределения твердости образца стали 40X после закалки

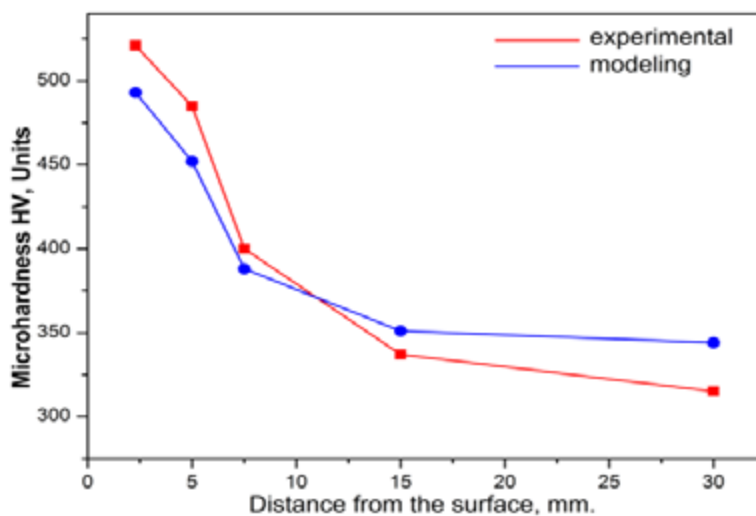


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для стали 40X

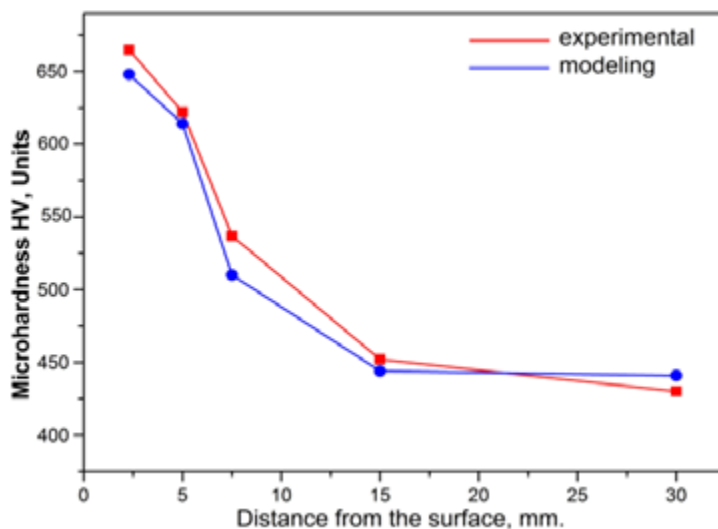


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для стали 60

Таким образом, модуль Heat Treatment программного обеспечения QForm VX является перспективным инструментом для моделирования процессов термической обработки. В процессе проведения эксперимента было установлено, что модель добавленного в базу данных материала обладает высокой степенью адекватности. В том случае, если модуль будет активно развиваться разработчиками программы — комплекс Qform имеет большие перспективы становления широко востребованной программой не только у специалистов в области обработки металлов давлением, но и в области моделирования процессов термической обработки.

### Библиографический список

1. Alves Zapata J. R. Modeling and Analysis of Electromagnetism in Magnetic Forming Processes / J. R. Alves Zapata, F. Bay // *IEEE Trans. Magn.* — 2016. — № 5(52). — Pp. 1–12.
2. Kang S. H. Three-dimensional thermo elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation / S. H. Kang, Y. T. Im // *International Journal of Mechanical Sciences.* — 2007. — № 49. — Pp. 423–439.
3. Койдан И. М. Исследование возможности моделирования формоизменения при тиксоштамповке в программном комплексе QForm / И. М. Койдан, С. А. Евсюков // *Технология легких сплавов.* — 2013. — № 3. — С. 104–107.
4. Воробьев А. А. Моделирование динамики подвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко и др. // *Новые материалы и технологии в машиностроении.* — 2015. — № 21. — С. 24–30.
5. Krutko A. A. Investigation of the properties of hardened steels during cutting based on the thermomechanical approach / A. A. Krutko, D. A. Sedykh, A. M. Badamshin et al. // *Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года.* — Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. — P. 012064.
6. Vorobev A. A. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking / A. Vorobev, N. U. Shadrina, A. A. Krutko et al. // *Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года.* — Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. — P. 072019. — DOI: 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.
7. Кванин В. Л. Моделирование и оптимизация процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок / В. Л. Кванин, Н. Т. Балихина, П. И. Краснощеков и др. // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* — 2005. — № 39. — С. 76–84.
8. Михайлин С. М. Моделирование процесса сверхвысокочастотной термической обработки абразивных инструментов на органических связках / С. М. Михайлин, А. Ш. Хусаинов // *СТИН.* — 2009. — № 1. — С. 14–20.
9. Федосов С. В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностекольной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, С. Н. Никишов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.* — 2017. — № 11. — С. 110–116.
10. Орехов А. В. Моделирование процессов интенсификации пеностекольной шихты при термической обработке / А. В. Орехов // *Новая наука: Современное состояние и пути развития.* — 2017. — Т. 2. — № 3. — С. 180–182.
11. Пачколина П. А. Моделирование термической обработки валков горячей прокатки в программе Qform / П. А. Пачколина // *Технология машиностроения и материаловедение.* — 2017. — № 1. — С. 13–14.
12. Бадамшин А. М. Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM HEAT TREATMENT / А. М. Бадамшин, З. Ю. Руппель, С. А. Черных и др. // *Техника и технологии машиностроения: материалы IX Международной научно-технической конференции, Омск, 8–10 июня 2020 года.* — Омск: Омский государственный технический университет, 2020. — С. 71–74.



13. Грост А. И. Железоуглеродистые стали и сплавы: структурообразование и свойства / А. И. Грост. — Минск: Беларус. навука, 2010. — 252 с.

14. Бернштейн М. Л. Структура и механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. — М.: Металлургия, 1970. — 472 с

15. Бадамшин А. М. Влияние режимов термоультразвуковой обработки на механические свойства образцов из стали 40X / А. М. Бадамшин, Д. А. Седых, З. Ю. Руппель и др. // Техника и технологии машиностроения: материалы IX Международной научно-технической конференции, Омск, 8–10 июня 2020 года. — Омск: Омский государственный технический университет, 2020.

*Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».*

Дата поступления: 27.05.2022

Решение о публикации: 30.08.2022

**Контактная информация:**

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

КРУТЬКО Андрей Александрович — канд. техн. наук, доц.; andrey\_904@mail.ru

БАДАМШИН Артем Маратович — ассистент; artembadamschin@mail.ru

## Modeling of Heat Treatment Processes in QFORM Heat Treatment Module

A. A. Vorobyov<sup>1</sup>, A. A. Krutko<sup>2</sup>, A. M. Badamshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Petersburg Emperor Alexander I State Transport University, 190031, St. Petersburg, Moskovsky pr., 9, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk State Technical University, 11 Mira Ave., Omsk, 655050, Russian Federation

**For citation:** Vorobyov A. A., Krutko A. A., Badamshin A. M. Modeling of Heat Treatment Processes in QFORM Heat Treatment Module // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 727–735. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-727-735

### Summary:

**Purpose:** To review algorithm methodology for the addition of a new material to Qform Heat Treatment Module database with further adequacy assessment of the model by the method of the comparison its microhardness distribution with experimental data. **Methods:** Technique for the modeling of heat treatment (hardening) of samples from steels 60 and 40Cr in QFORM Heat Treatment software module has been developed. Algorithm for new material addition into software package database with adequacy further assessment for built model by the method of comparison of obtained data on distribution of microhardness over a section while process modeling in Qform with laboratory experiment data is presented. **Results:** Models of hardness distribution over the diametrical section of hardened cylindrical samples from steel 60 and adapted steel 40X, built into QFORM Heat treatment database. Comparison of modeling results with experimental data on hardness distribution of hardened samples. **Practical significance:** The results, obtained in this work, represent algorithm for replenishing the database of Qform Heat Treatment Module, created for the purpose to carry out heat treatment procedures for steels and non-ferrous alloys. During experiment pursuing, it was established that the model of added to the database material demonstrates adequacy high degree. The expansion of the database of given materials of the given Module will allow its widespread application in the industries which activities are related to heat treatment.

**Keywords:** Heat treatment, computer simulation, Qform, hardening, microhardness, hypoeutectoid steels.

## References

1. Alves Z J. R., Bay F., Modeling and Analysis of Electromagnetism in Magnetic Forming Processes. *IEEE Trans. Magn.* 2016, I. 5 (52), pp. 1–12.
2. Kang S. H., Im Y. T. Three-dimensional thermo elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2007, I. 49, pp. 423–439.
3. Koydan I. M., Evsyukov S. A. Issledovanie vozmozhnosti modelirovaniya formoizmeneniya pri tiksozhtampovke v programmnom komplekse QForm [Evsyukov, Investigation of the possibility of modeling the shape change during thixo-stamping in the QForm software package]. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2013, I. 3, pp. 104–107. (In Russian)
4. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G., Merochnik K. A. Modelirovanie dinamiki podvizhnogo sostava [Modeling of rolling stock dynamics]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering]. 2015, I. 21, pp. 24–30. (In Russian)
5. Krutko A. A., Sedykh D. A., Badamshin A. M., Vorobiev A. A. Investigation of the properties of hardened steels during cutting based on the thermomechanical approach. *Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 marta 2020 goda.* Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012064.
6. Vorobev A. A., Shadrina N. U., Krutko A. A., Badamshin A. M. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking. *Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 aprelya 2019 goda.* Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 072019. DOI 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.
7. Kvanin V. L., Balikhina N. T., Krasnoshchekov P. I. Modelirovanie i optimizatsiya protsessa radial'nogo SVS-pressovaniya tsilindricheskikh zagotovok [Modeling and optimization of the process of radial SHS pressing of cylindrical blanks]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences]. 2005, I. 39, pp. 76–84. (In Russian)
8. Mikhaylin S. M. *Modelirovanie protsessa sverkhvysokochastotnoy termicheskoy obrabotki abrazivnykh instrumentov na organicheskikh svyazkakh* [Modeling of the process of ultrahigh-frequency heat treatment of abrasive tools on organic binders]. *STIN.* 2009, I. 1, pp. 14–20. (In Russian)
9. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Variativnost' podkhodov k mate-maticheskomu modelirovaniyu protsessov termicheskoy obrabotki penostekol'noy shikhty [Variability of approaches to mathematical modeling of the processes of heat treatment of foam glass mixture]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov]. 2017, I. 11, pp. 110–116. (In Russian)
10. Orekhov A. V. Modelirovanie protsessov intensivatsii penostekol'noy shikhty pri termicheskoy obrabotke [Modeling the processes of intensification of the foam-glass charge during heat treatment]. *Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya* [New Science: Current state and ways of development]. 2017, vol. 2, I. 3, pp. 180–182. (In Russian)
11. Pachkolina P. A. Modelirovanie termicheskoy obrabotki valkov goryachey prokatki v programme Qform [Modeling the heat treatment of hot rolling rolls in the Qform program]. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie* [Engineering technology and materials science]. 2017, I. 1, pp. 13–14. (In Russian)
12. Badamshin A. M., Ruppel' Z. Yu., Chernykh S. A. Modelirovanie pro-tsessov termicheskoy obrabotki v module QFORM HEAT TREATMENT [Modeling of heat treatment processes in the QFORM HEAT TREATMENT module]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 08–10 iyunya 2020 goda* [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the IX International Scientific and Technical conference, Omsk, June 08–10, 2020]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet Publ., 2020, pp. 71–74. (In Russian)



13. Grost A. I. *Zhelezouglerodistye stali i splavy: strukturoobrazovanie i svoystva* [Iron-carbon steels and alloys: structure formation and properties]. Minsk: Belarus. Navuka Publ. 2010. 252 p. (In Russian)

14. Bernshteyn M. L., Zaymovskiy V. A. *Struktura i mekhanicheskie svoystva metallov* [Structure and mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ. 1970. 472 p. (In Russian)

15. Badamshin A. M., Sedykh D. A., Ruppel' Z. Yu. Vliyanie rezhimov ter-moul'trazvukovoy obrabotki na mekhanicheskie svoystva obrabotkov iz stali 40Kh [Influence of thermal ultrasonic processing modes on the mechanical properties of specimens made of steel 40Kh]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya : Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 08–10 iyunya 2020 goda* [Engineering and technology of mechanical

engineering: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Omsk, June 08–10, 2020]. Omsk: Omskiy gosudar-stvennyy tekhnicheskyy universitet Publ., 2020. (In Russian)

Received: May 27, 2022

Accepted: August 30, 2022

**Author's information:**

Alexander A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Andrey A. KRUTKO — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey\_904@mail.ru

Artem M. BADAMSHIN — Assistant; artembadamschin@mail.ru