



Received: 09.08.2023

Revised: 02.10.2023

Accepted: 20.10.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.053-068

FINITE ELEMENT SIMULATION OF FRICTIONAL SURFACE HARDENING BY A ROTARY TOOL DURING THE HARDENING OF THE FACES OF FIXATION HOLES FOR WASHERS

G. Zh. Mukanov^{1, a), *}, V. P. Kuznetsov^{1, b)}, V. P. Shveikin^{2, c)}, and I. S. Kamantsev^{2, d)}

¹*Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

²*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

a) <https://orcid.org/0000-0001-5611-4064> g.zh.mukanov@urfu.ru;
b) <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345> wpkuzn@mail.ru;
c) <https://orcid.org/0000-0002-9316-1369> shveikin60@mail.ru;
d) <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043> ks@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: g.zh.mukanov@urfu.ru
Address for correspondence: ul. Mira, 28, Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: +7 (912) 692-4334

The paper discusses a methodology for simulating friction stir processing in order to determine the process parameters and to provide surface hardening for flanges with a cavity. In accordance with the developed methodology presented by the results of literature analysis, it describes a computational computer model developed in Ansys Mechanical and based on the finite element method. The thermophysical properties of the material under study and the tool material, which are taken into account in the FEM simulation of the processes, are presented as dependent on temperature. By comparison with experimental research, the simulation results are verified in terms of a number of parameters, such as the depth of the hardened layer and the diameter of the surface area of the faces of holes for bolted joints. The results of measuring the microhardness of the hardened layers of the AISI 420 steel are presented, and their dependence on the depth of the hardened layer is determined. Numerical simulation is used to compute the values of the geometrical parameters of the areas subjected to surface hardening by friction stir processing with the variation of the process parameter, namely tool rotation speed, the force acting along the normal to the surface being processed, and the friction coefficient. The numerical simulation gives results on the thermal state of the specimen, particularly, maximum temperatures in the contact zone, as well as temperature and time dependences.

Keywords: friction stir processing, simulation, thermal cycle, FEM, surface heat treatment

References

1. Eliseev, A.A., Fortuna, S.V., Kolubaev, E.A., and Kalashnikova, T.A., Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 691, 121–125. DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.040.
2. Krasauskas, P., Kilikevičius, S., Česnavičius, R., and Pačengaetc, D. Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process. *Mechanika*, 2014, 20 (6), 590–595. DOI: 10.5755/j01.mech.20.6.8664.



3. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, 50 (1–2), 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
4. Aldajah, S.H., Ajayi, O.O., Fenske, G.R., and David, S. Effect of friction stir processing on tribological performance of high carbon steel. *Wear*, 2009, 267, 350–355. DOI: 10.1016/J.WEAR.2008.12.020S.
5. Churyumova, I.A. Razrabotka tekhnologiy uprochneniya boltovykh otverstiy v zhelezodorozhnykh relsakh [Developing the Processes of Hardening of Bolt Holes in Railway Rails: Candidate Thesis Abstract]. Moscow, 1991, 28 p.
6. Voropaev, V.V. Upravlenie poverkhnostnoy zakalkoy koltsevykh uchastkov stali 20Kh13 pri obrabotke treniem s peremeshivaniem [Controlling the Surface Hardening of Circular Areas in the 20Kh13 Steel (AISI 420) During Friction Stir Processing: Cand. Thesis]. Ekaterinburg, 2021, 169 p.
7. GOST 4543–2016. Interstate Standard. Structural Alloy Steel Products: Specifications.
8. Zhang, Z., Farahmand, P., and Kovacevic, R. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high-power direct diode laser. *Materials & Design*, 2016, 109, 686–699. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.114.
9. Rech, J., Arrazola, P., Claudin, C., Courbon, C., Pušavec, F., and Kopac, J. Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting. *Manufacturing Technology*, 2013, 62 (1), 79–82. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.099.
10. Kuznetsov, V.P., Voropaev, V.V., and Skorobogatov, A.S., ed. by A.A. Popov. Friksionnaya poverkhnostnaya zakalka vrashchayushchimsya instrumentom [Frictional Surface Hardening of Steels by a Rotating Tool: Tutorial Higher Education Students]. Izdatelstvo Uralskogo Universiteta Publ., Ekaterinburg, 2022.
11. GOST 11371–78. Interstate Standard. Washers. Specifications.



Подана в журнал: 09.08.2023

УДК 621.78

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.053-068

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРИКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ТОРЦОВ КРЕПЕЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПОД ШАЙБЫ

Г. Ж. Муканов^{1, а)}*, В. П. Кузнецов^{1, б)}, В. П. Швейкин^{2, в)}, И. С. Каманцев^{2, г)}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

а)  <https://orcid.org/0000-0001-5611-4064>  g.zh.mukanov@urfu.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>  wpkuzn@mail.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0002-9316-1369>  shveikin60@mail.ru;
г)  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: g.zh.mukanov@urfu.ru
Адрес для переписки: ул. Мира, 28, г. Екатеринбург, 620002, Россия
Тел.: +7 (912) 692-43-34

Представлена методика моделирования процесса обработки трением с перемешиванием для определения параметров процесса и обеспечения поверхностной закалки для фланцев с полостью. В соответствии с разработанной методикой, представленной по результатам литературного анализа, описана разработанная в программном обеспечении Ansys Mechanical расчетная компьютерная модель, основанная на методе конечных элементов. Приведены теплофизические свойства исследуемого материала и материала инструмента в температурной зависимости, которые учтены в МКЭ-моделировании процессов. Путем сравнения с экспериментальными исследованиями проведена верификация результатов моделирования по ряду параметров, среди которых глубина закаленного слоя и диаметр поверхностного участка торцов отверстий под болтовые соединения. Представлены результаты измерений микротвердости упрочненных слоев стали 20Х13, и определена их зависимость от глубины упрочняемого слоя. Методом численного моделирования вычислены значения геометрических параметров участков, подвергаемых поверхностной закалке в результате проведения обработки трением с перемешиванием с вариацией технологических параметров, таких как скорость вращения инструмента, сила, действующая по нормали к обрабатываемой поверхности, коэффициент трения. В результате численного моделирования получено тепловое состояние исследуемого образца, в частности максимальные температуры в контактной зоне и температурно-временные зависимости.

Ключевые слова: обработка трением с перемешиванием, моделирование, термический цикл, МКЭ, поверхностная закалка

1. Введение

В настоящее время набирают популярность технологии фрикционного воздействия на материал для достижения необходимого уровня механических свойств металлических материалов. Один из таких методов – фрикционное сверление, которое включает в себя такие физические процессы, как трение и выдавливание. Материал подвергается интенсивному



нагреву и деформации, которые влияют на его микроструктуру. Сверление трением очень похоже на точечную сварку трением с перемешиванием или обработку трением с перемешиванием [1].

В работе [2] было проведено подробное моделирование процесса фрикционного сверления и получен ряд результатов, таких как зависимость осевой силы и крутящего момента от времени, тепловое состояние на поверхности образцов. Результаты исследования позволили авторам сделать вывод, что предположения, принятые в моделировании, верны и реалистично определяют процесс фрикционного сверления. А расчетная модель в дальнейшем будет полезна для предварительного прогнозирования режимов фрикционного сверления с целью снижения осевых сил и, как следствие, снижения износа инструмента. Изменение температуры поверхностного слоя при моделировании было получено в местах измерений при эксперименте и показало высокую сходимость. Одной из особенностей расчетной методики было применение адаптивной сетки и перенос параметров решения с существующей сетки на вновь образованную. Данный подход применяется в расчетных моделях настоящей работы.

В начале 2000-х годов Р. С. Мишра и др. разработали метод обработки трением с перемешиванием (ОТП), или friction stir processing (FSP), который применяется для упрочнения поверхностных слоев сталей и сплавов. Позже, в работе [3], был описан эффект поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием и определены основные параметры, влияющие на свойства упрочненного материала: скорости вращения и подачи инструмента и сила, действующая по нормали к обрабатываемой поверхности. Проводится все больше исследований по применению процесса ОТП к различным сортам стальных материалов [4] в качестве средства для упрочнения поверхности и повышения износостойкости.

Процесс фрикционной закалки включает нагрев материала в поверхностной области до температуры, превышающей температуру аустенизации, и последующее быстрое охлаждение, в результате чего аустенитная фаза превращается в мартенсит. Способ нагрева часто является отличительной чертой многочисленных методов термического упрочнения.

Тепло, выделяемое в процессе трения вращающимся инструментом, может повысить температуру материала поверхностного слоя до значений, превышающих температуру аустенизации, а охлаждение материала может быть достаточно быстрым для образования мартенситной фазы. Таким образом, крайне важно определить необходимые параметры фрикционной поверхностной закалки для достижения основного механизма фазового перехода и упрочнения материала.

Во многих отраслях встречаются детали, имеющие крепежные отверстия, торцы которых испытывают значительные нагрузки. Чтобы повысить их прочность, надежность и долговечность, необходимо производить их упрочнение.

Известны устройства обработки внутренних поверхностей и торцов отверстий [5].

В черных металлах, таких как сталь, на долю которой приходится подавляющее большинство деталей с отверстиями для фланцевых соединений, основным базовым механизмом поверхностного упрочнения является фазовое превращение с образованием относительно твердой мартенситной фазы в поверхностном слое.

Подавляющее большинство компонентов, работающих в контактном взаимодействии, которые обычно подвергаются поверхностному упрочнению, изготавливаются из легированных сталей различных марок. Одним из таких широко используемых сплавов является сталь 20X13, которая используется для изготовления различных компонентов в различных отраслях промышленности, начиная с аэрокосмической и заканчивая автомобильной.

2. Образцы и методика исследований

В этой статье представлено конечно-элементное моделирование процесса обработки трением с перемешиванием для упрочнения фаз стали торцевых поверхностей под шайбы. Выполнено исследование влияния таких параметров, как частота вращения инструмента, сила, действующая по нормали к рабочей поверхности, время нагрева, скорость охлаждения материала для обеспечения процесса закалки в зоне контакта шайбы.

Материалом исследуемого образца является лист из стали 20X13. Химический состав стали 20X13 в состоянии поставки указан в таблице 1 [6].

Таблица 1

Химический состав стали 20X13 в состоянии поставки [4]

Элементы	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
%	0,35...0,42	0,17...0,37	0,30...0,60	1,25...1,65	1,35...1,75	0,20...0,30	Остальное

В качестве материала инструмента используется твердый сплав KMG303 фирмы ZCC СТ типа WC-Co [7].

Процесс упрочняющей поверхностной закалки заключается в нагреве материала фланца с несколькими отверстиями под крепежное соединение. Процесс реализуется вокруг отверстия инструментом с плоским торцом с постоянной частотой вращения n и нормальной силой инструмента F_H . В зоне контакта инструмента с деталью необходимо обеспечить интенсивный нагрев до температур закалки стали 20X13 и быстрое охлаждение. Схема процесса показана на рис. 1.

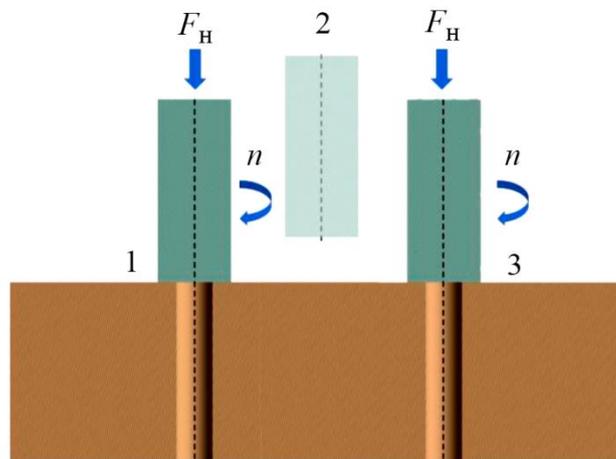


Рис. 1. Схема процесса упрочняющей обработки торцов крепежных отверстий фланцев фрикционной поверхностной закалкой: 1 – упрочняющая обработка первого отверстия; 2 – промежуточное состояния (инструмент переводится в нейтральную зону); 3 – упрочняющая обработка второго отверстия

В основу управления поверхностной закалкой инструментом с плоским торцом положен теоретический подход, основанный на составлении и поэтапном решении многофакторной задачи установления взаимосвязи параметров процесса и термического цикла:

1) определение требуемой мощности фрикционного тепловыделения P_{μ} , плотности теплового потока q_M и времени t_p , необходимых для разогрева материала до температуры $T_M > A_{C3}$

в зависимости от комбинации величин нормальной силы F_n , частоты вращения n и коэффициента трения μ в контакте инструмента (этап управления тепловыделением и разогревом); 2) выявление взаимосвязи температуры T_m и скорости нагрева $v_n = dT_m/dt$ материала, а также температурной выдержки t_γ при $T_m > A_{C3}$ и глубины диффузии углерода h_D в поверхностный слой со скоростью подачи инструмента f_n , при которой происходит полная аустенизация и не допускается расплавление материала в контактной зоне (этап управления аустенизацией); 3) установление зависимости скорости охлаждения материала $v_{ох}$ от подачи инструмента f_n , обеспечивающей при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении формирование мартенситной фазы на заданной глубине от поверхности (этап управления охлаждением) [6].

Инструмент представляет собой цилиндр из инструментального материала WC–Co с диаметром 10 мм.

Для описания материала исследуемого образца 20X13 приняты нелинейные зависимости плотности, теплопроводности и теплоемкости от температуры для материала AISI 420 (аналога стали 20X13), полученные в работе [8]. Основные теплофизические свойства, заданные в расчётной модели, указаны на рис. 2: плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость.

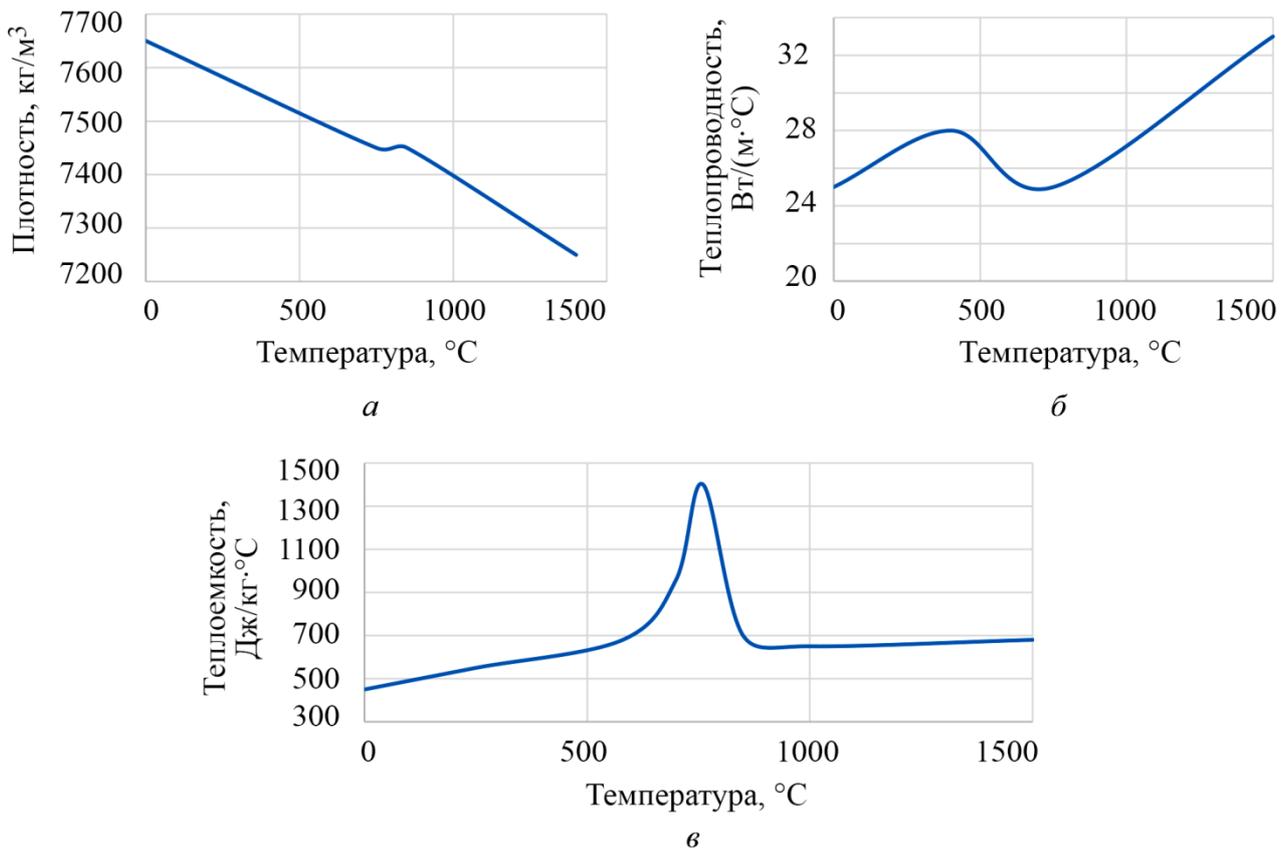


Рис. 2. Зависимости изменения плотности (а), коэффициента теплопроводности (б), удельной теплоёмкости (в) стали 20X13 от температуры [8]

Для описания материала инструмента WC–Co принята плотность $\rho = 14700$ кг/м³, а также нелинейные зависимости температуропроводности и теплопроводности от температуры, полученные в работе [6]. Основные теплофизические свойства, заданные в расчетной модели, указаны на рис. 3: удельная теплоемкость принята 400 Дж/(кг·°C).

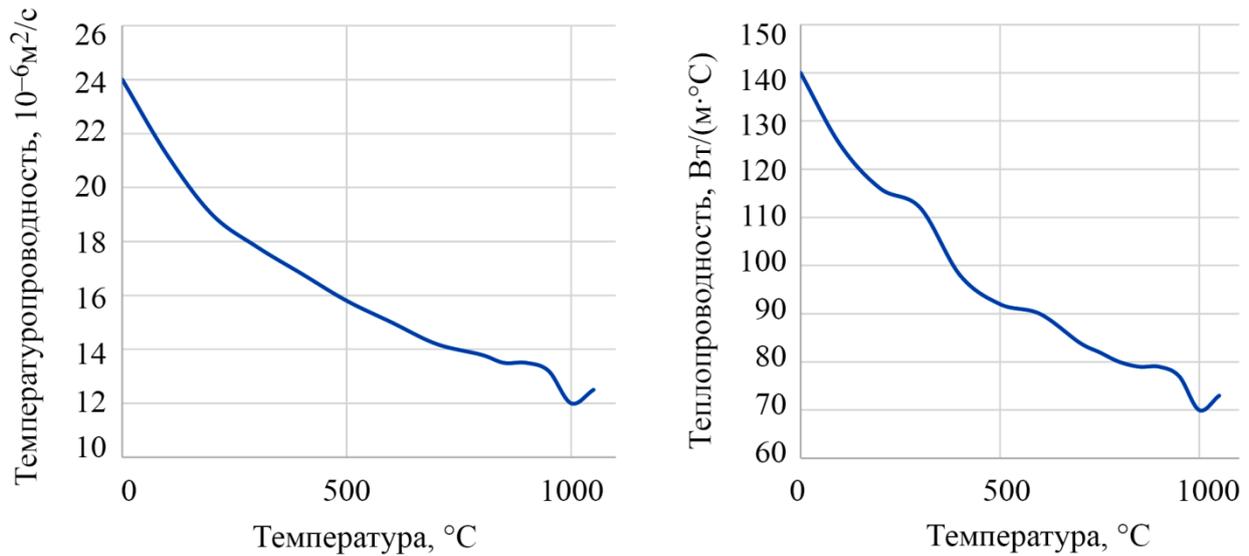


Рис. 3. Зависимости изменения температуропроводности (а) и теплопроводности (б) инструментального материала WC–Co от температуры [6]

Для разработки модели закалки и процесса разогрева материала инструментом была использована методика определения взаимосвязи технологических параметров процесса обработки трением с перемешиванием (нормальной силы F_n , частоты вращения инструмента n и коэффициента трения μ) с параметрами тепловыделения (мощностью тепловыделения P_μ и плотностью теплового потока q_m), полученная в работе [6].

На основе этой методики [6] мощность фрикционного тепловыделения P_μ в контакте цилиндрического инструмента с плоским торцом радиусом R_n может быть определена по следующей зависимости:

$$P_\mu = \frac{4}{3} \pi \mu F_n n R_n, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения; F_n – нормальная сила, Н; n – частота вращения инструмента, об/мин.

$$q_m = \frac{\eta_m P_\mu}{S_c} = \frac{\eta_m P_\mu}{\pi R_n^2}, \quad (2)$$

где η_m – коэффициент разветвления (доля) выделяемого тепла в заготовку.

Коэффициент η_m с учетом теплового потока в инструмент и мощности тепловыделения может быть вычислен по следующей зависимости:

$$\eta_m = \frac{\Phi_m}{P_\mu} = 1 - \frac{\Phi_n}{P_n}, \quad (3)$$

где Φ_m и Φ_n – тепловые потоки, поглощаемые материалом и инструментом соответственно.

Время разогрева исследуемого материала 20X13 t_p определяется по достижению температурой нагрева T_m диапазона $A_{C3} \leq T_m$

При проведении литературного обзора установлено, что коэффициент трения μ между инструментом и конструкционной сталью следует принимать в диапазоне 0,2...0,3 [9].

Методика конечно-элементного моделирования. С целью исследования изменения параметров теплового состояния во взаимосвязи с временем, технологическими параметрами

процесса и коэффициентом трения была разработана расчетная конечно-элементная модель с использованием программного обеспечения Ansys Mechanical Workbench. В основе тепловой модели заложено нелинейное уравнение теплопередачи

$$\frac{\partial(\rho(T)c_p(T)T)}{\partial t} = \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial z^2} + Q_{\text{int}}, \quad (4)$$

где k – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоёмкость; ρ – плотность материала, Q_{int} – мощность внутреннего тепловыделения.

Геометрические характеристики исследуемого образца и инструмента взяты согласно рекомендациям, представленным в учебном пособии [10]. На рис. 4 и далее в работе для наглядности представлена рабочая зона одного отверстия, при этом моделирование проводилось для фланца целиком, согласно схеме на рис. 1.

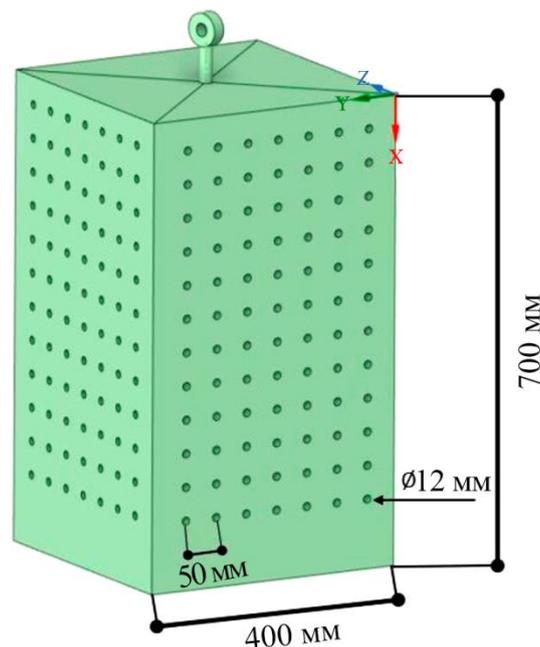


Рис. 4. Геометрические характеристики исследуемого образца

Для оценки качества сетки использовали обобщенный показатель качества Element Quality. В рассматриваемом случае указанный показатель изменяется в диапазоне от 0,831 до 0,999, что свидетельствует о низкой вероятности корректности выбора адаптивного преобразования сетки. При повышении порогового значения данного показателя значительно увеличивается расчетное время вычислений. В дальнейших исследованиях планируется повышать данное значение для улучшения качества сетки.

Размер одной элементарной ячейки составляет 0,5 мм. Общее количество узлов 1 223 799, общее количество элементов 295 219. Рисунок 5 отражает сеточную структуру расчетной модели исследуемого образца. Контактная зона торца инструмента разбита на сетку конечных элементов с размерами элементарной ячейки 0,05 мм.

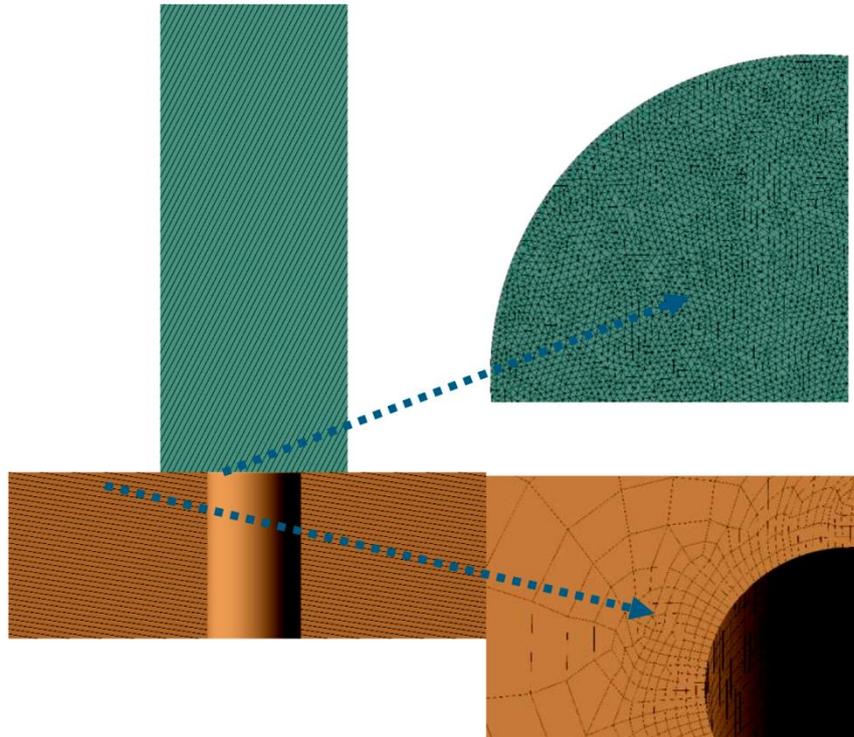


Рис. 5. Сеточная структура расчетной модели исследуемого образца и инструмента

3. Результаты расчетного исследования, проведенного в программном комплексе Ansys, и их обсуждение.

Расчетное исследование процесса показало, что наибольший нагрев материала поверхностного слоя происходит под инструментом в области, прилежащей к краю контактной зоны (рис. 6).

Согласно схеме процесса упрочняющей обработки торцов крепежных отверстий фланцев фрикционной поверхностной закалкой (рис. 1), инструмент после выполнения работы на первом отверстии (положение 1) переходит в промежуточное положение (положение 2) для установки контакта со следующим отверстием (положение 3). В промежуточном положении 2 инструмент остывает в связи с условиями конвекционной теплоотдачи в окружающую среду. Изменение контактной температуры инструмента в течение промежуточного положения отражено на рис. 7.

В данной работе исследуется упрочнение опорных поверхностей резьбовых соединений. Для повышения надежности соединения необходимо обеспечивать отсутствие деформации соединяемых поверхностей. Это определяется пределом смятия в опорных участках фланцев. Такой участок расположен в зоне контакта соединяемой детали с шайбой. Диаметр отверстия для резьбового соединения принимается для болта М8 и равен $d_1 = 7,6$ мм. При этом диаметр упрочненной опорной поверхности исследуемого образца представлен в табл. 2 для разных режимов обработки.

С целью инициирования процесса закалки для заданной опорной зоны в данной работе также определяются параметры технологии обработки трением с перемешиванием исходя из определения ряда краевых условий. На рис. 8 приведена схема расчетной модели.

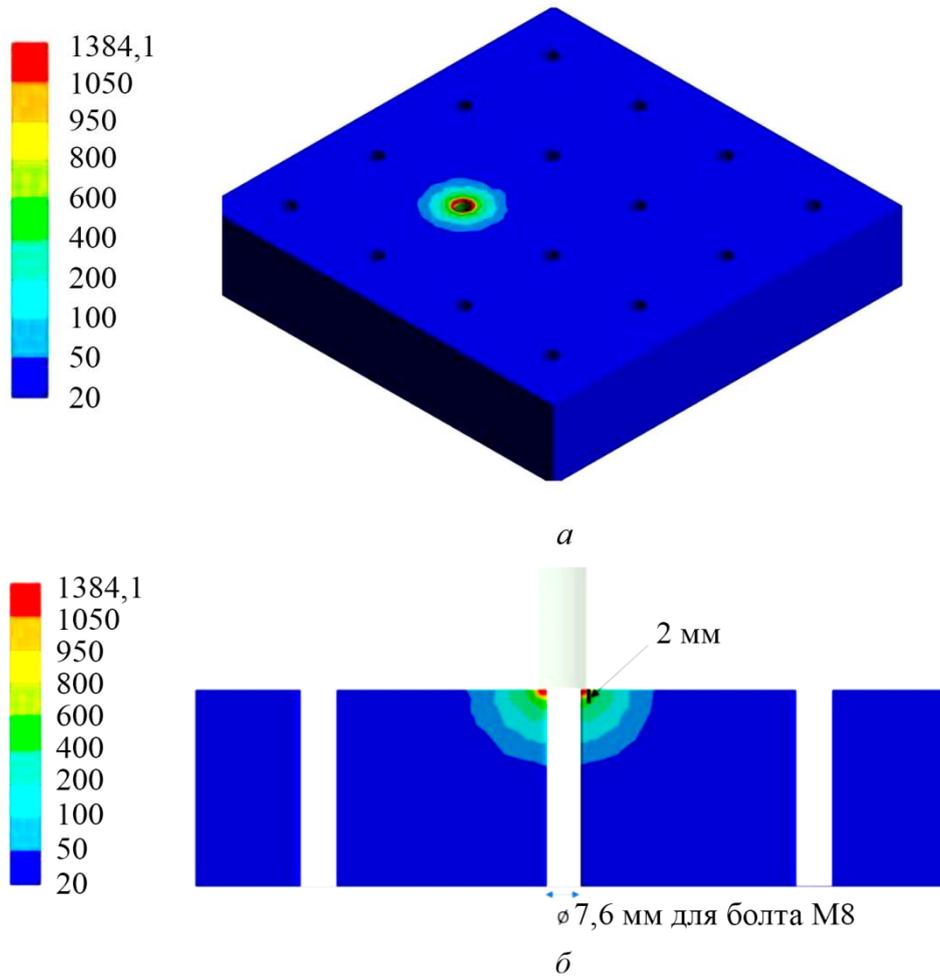


Рис. 6. Пример распределения температуры в системе «инструмент – обрабатываемый материал» при предварительном разогреве в течение $t_{\text{н}} = 5$ с при мощности тепловыделения $P_{\mu} = 1200$ Вт: температурное состояние части заготовки в трехмерном виде (а); температурное состояние части заготовки в разрезе (б)

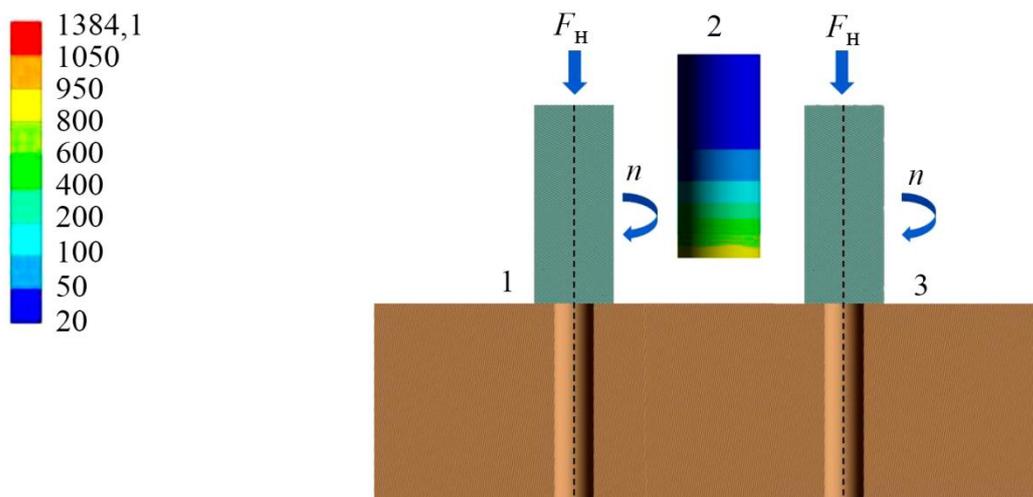


Рис. 7. Изменение контактной температуры материала инструмента в промежуточном положении (без контакта с образцом) при мощности тепловыделения 1200 Вт

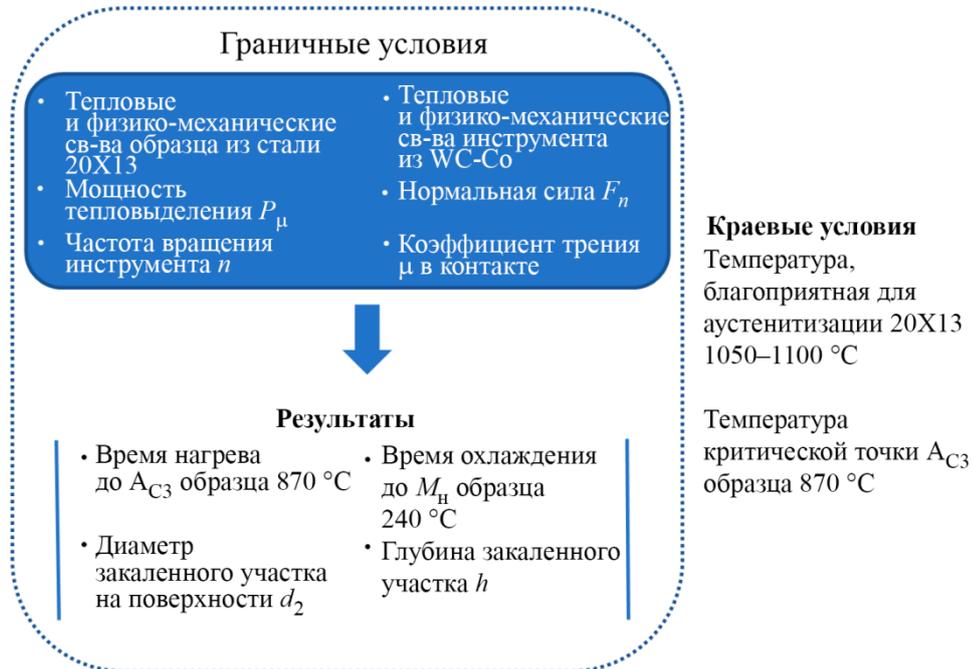


Рис. 8. Схема расчетной модели

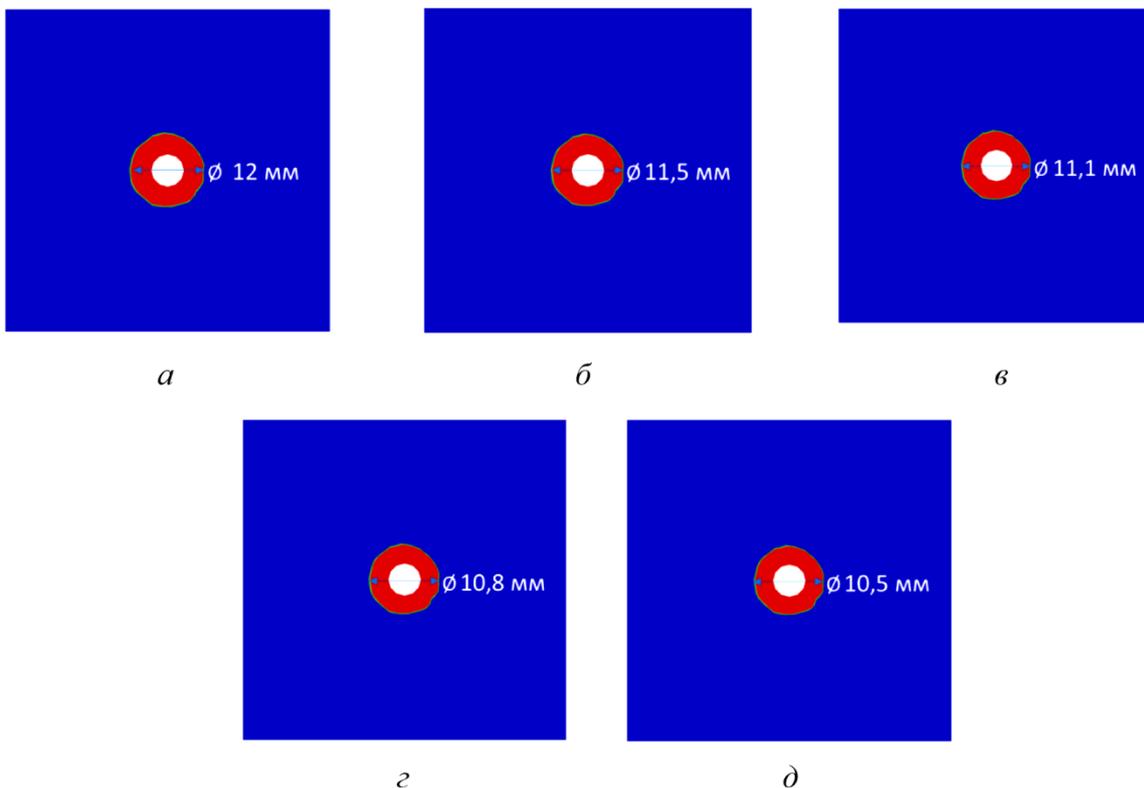


Рис. 9. Диаметры участков в интервале температур от 870 до 1050°C при разных режимах работы: $P_\mu = 800$ Вт (*a*); $P_\mu = 1000$ Вт (*б*); $P_\mu = 1200$ Вт (*в*); $P_\mu = 1400$ Вт (*г*); $P_\mu = 1800$ Вт (*д*)

Таблица 2

Зависимость мощности тепловыделения P_{μ} и времени разогрева t_n до температуры A_{C3}

№	$F_n, Н$	$n, об/мин$	μ	$P_{\mu}, Вт$	Время разогрева		Размеры закаленного участка	
					до 1050 °С	до 870 °С	Диаметр $d_2, мм$	Глубина $h, мм$
1	2500	2000	0,2	331,6	–	–	–	–
2			0,3	497,4	–	–	–	–
3		3000	0,2	497,4	–	–	–	–
4			0,3	746,1	23,5	12,8	12	2
5		4000	0,2	663,2	38,9	–	12	2,1
6			0,3	994,8	9,3	5,6	11,5	1,65
7		5000	0,2	829,0	17,7	10,4	11,7	1,7
8			0,3	1243,5	5,1	1,4	11,1	1,5
9		6000	0,2	994,8	9,3	5,6	11,5	1,65
10			0,3	1492,3	3,1	1,6	10,5	1,25
11	3000	2000	0,2	397,9	–	–	–	–
12			0,3	596,9	48,0	–	12,2	2,3
13		3000	0,2	596,9	48,0	–	12,2	2,3
14			0,3	895,4	16,9	–	11,7	1,9
15		4000	0,2	795,9	19,5	11	11,7	1,9
16			0,3	1193,8	6,7	2,3	11,1	1,55
17		5000	0,2	994,8	9,3	5,6	11,5	1,65
18			0,3	1492,3	3,1	1,6	10,5	1,25
19		6000	0,2	1193,8	6,7	2,3	11,1	1,55
20			0,3	1790,7	1,7	1,1	10,3	1,2
21	3500	2000	0,2	464,3	–	–	12,2	2,5
22			0,3	696,4	34,8	–	11,9	2,2
23		3000	0,2	696,4	34,8	–	11,9	2,2
24			0,3	1044,6	8,8	–	11,3	1,65
25		4000	0,2	928,5	11,1	6,2	11,3	1,6
26			0,3	1392,8	3,8	2,7	10,8	1,4
27		5000	0,2	1160,6	6,9	3,3	11,1	1,55
28			0,3	1741,0	2,1	1,3	10,3	1,1
29		6000	0,2	1392,8	3,8	2,7	10,8	1,4
30			0,3	2089,2	0,7	–	9,5	0,9

По результатам ряда расчетных итераций согласно режимам, представленным в табл. 2, были получены значения целевых параметров, определяющих результаты данного исследования (рис. 9).

На основе расчетного анализа параметров термических циклов поверхностной закалки построены диаграммы нагрева с последующим непрерывным охлаждением обрабатываемого материала поверхностного слоя в процессе обработки трением с перемешиванием для разных мощностей тепловыделения (рис. 10).

Поведение температурно-временных характеристик в ключевых точках на линиях разных тепловых мощностей имеет существенные отличия в интервале от линии 1800 Вт до линии 800 Вт (рис. 10). Кроме того, при охлаждении после нагрева при наименьшей тепловой мощности импульса температура не падает ниже границы мартенситного превращения

до длительности 50 секунд и выше. В результате этого обрабатываемый материал продолжительное время находится в диапазоне температур перлитного превращения. Вследствие этого при охлаждении мартенситная фаза может либо не образовываться вовсе, либо ее доля может значительно уменьшиться.

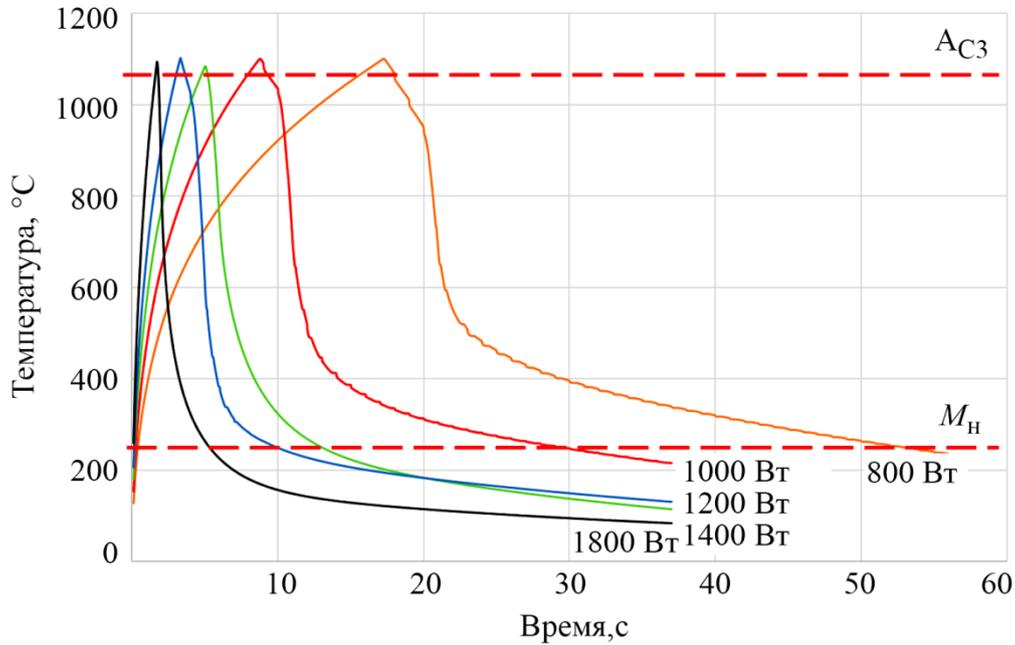


Рис. 10. Температурно-временные параметры термического цикла поверхностной закалки в торцевых поверхностях отверстий в процессе фрикционной обработки

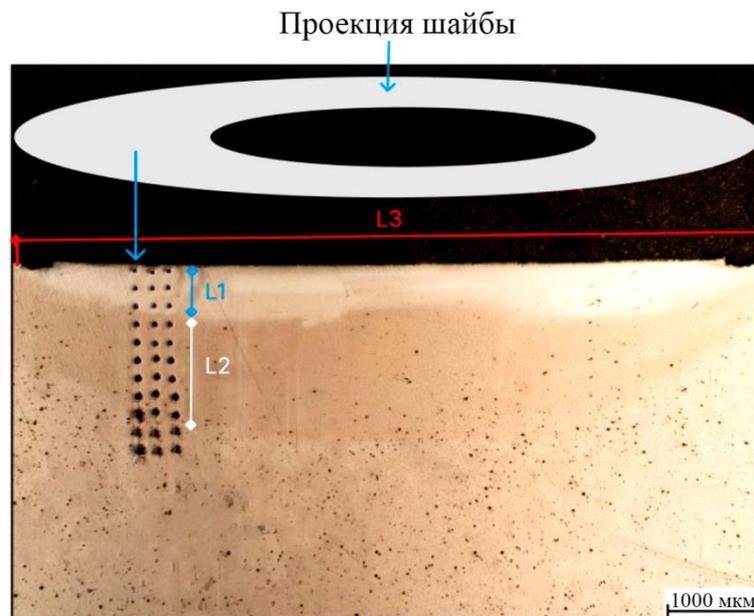


Рис. 11. Оптическая микроскопия структуры в поперечном разрезе после обработки трением с перемешиванием

Разработанные конечно-элементные тепловые модели поверхностной закалки в пакете Ansys Mechanical Workbench, позволили установить влияние технологических параметров процесса и коэффициента трения на изменение температуры в обрабатываемой стали и ин-

струменте на этапах предварительного разогрева, аустенизации и охлаждения при поверхностной закалке торцов с отверстиями.

На рис. 11 приведены результаты оптической микроскопии поверхностного слоя исследуемого образца из стали 20X13 в поперечном сечении области поверхностной закалки после процесса фрикционного перемешивания при следующем режиме: $F_n = 3500$ Н; $n = 3000$ об/мин; $\mu = 0,3$.

Определено, что максимальная глубина слоя L1 в зоне под шайбу достигает 500 мкм. При этом глубина слоя L2 в зоне под шайбу достигает 950 мкм. Диаметр упрочненной зоны L3 достигает 10 мм, что соответствует диаметру шайбы согласно [11].

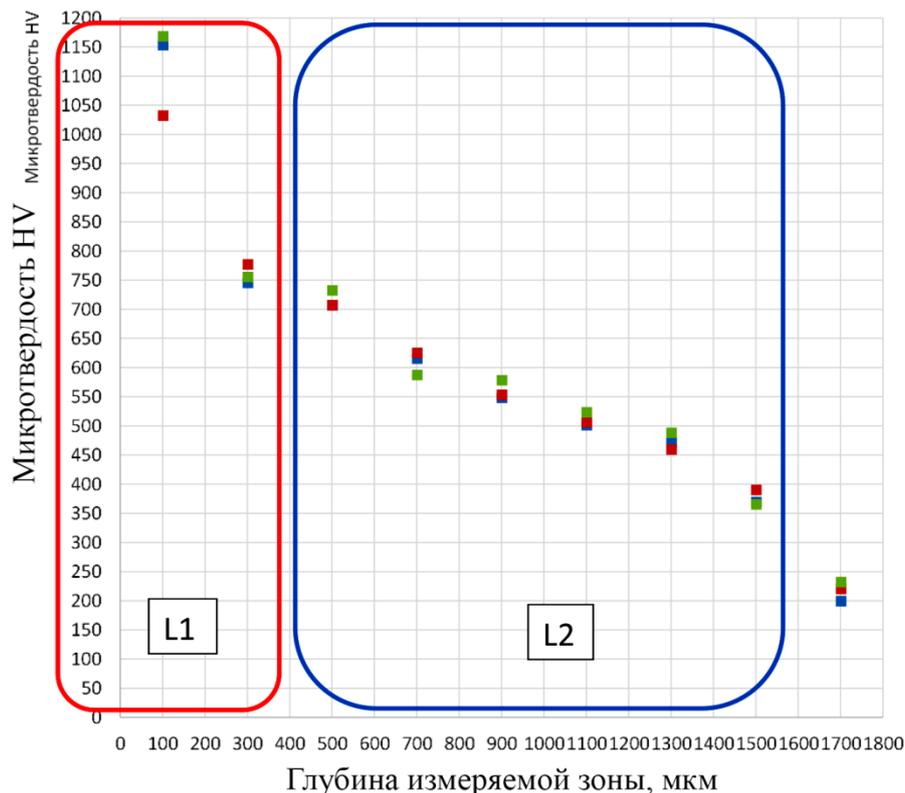


Рис. 12. Результаты измерения микротвердости упрочненных участков образца: L1 – первый упрочненный слой; L2 – второй упрочненный слой

На рис. 12 представлены экспериментальные результаты измерения микротвердости поверхностного слоя исследуемого образца из стали 20X13 в поперечном сечении области поверхностной закалки после процесса фрикционного перемешивания при следующем режиме: $F_n = 3000$ Н; $n = 3000$ об/мин; $\mu = 0,3$. Измерения проводились в области контакта шайбы с образцом (по средней линии кольцевой проекции).

По результатам экспериментальных измерений выявлено, что твердость первого упрочненного участка (от поверхности образца до глубины 500 мкм) изменяется от 1169 HV до 708 HV. При этом значение микротвердости снижается с отдалением от зоны контакта рабочей зоны образца с инструментом.

Твердость второго упрочненного участка (от 500 до 1450 мкм) изменяется в пределах от 626 HV до 200 HV. При этом значение микротвердости снижается с отдалением от зоны контакта рабочей зоны образца с инструментом.



4. Заключение

Следует подчеркнуть важность изучения методов упрочнения опорных поверхностей резьбовых соединений. С учетом цели повышения надежности таких соединений особое внимание уделяется преодолению деформаций, которые могут возникнуть на поверхностях в процессе эксплуатации. Ключевым аспектом в данном контексте является определение предельной деформации в критических участках фланцев. Эти критические участки занимают место в точках контакта между соединяемыми деталями и шайбой.

С использованием расчетного анализа параметров термических циклов были построены наглядные диаграммы, иллюстрирующие процесс нагрева и последующего охлаждения поверхностного слоя материала в процессе обработки трением с перемешиванием. Это позволило рассмотреть различные мощности тепловыделения и их влияние на процесс.

Кроме того, для более глубокого понимания эффектов процесса и для нахождения коэффициента трения были разработаны конечно-элементные тепловые модели с использованием пакета Ansys Mechanical Workbench. Эти модели позволили более детально рассмотреть изменение температуры на различных этапах процесса поверхностной закалки, начиная с предварительного разогрева, проходя через аустенизацию и завершая охлаждением при обработке торцевых сечений с отверстиями.

Таким образом, результаты данного исследования имеют практическую значимость, предоставляя информацию о влиянии технологических параметров и коэффициента трения на температурные характеристики в различных фазах процесса поверхностной закалки. Это будет способствовать дальнейшему развитию оптимизированных методов упрочнения резьбовых соединений и повышению их надежности в промышленных приложениях.

Литература

1. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling / A. A. Eliseev, S. V. Fortuna, E. A. Kolubaev, T. A. Kalashnikova // *Materials Science & Engineering*. – 2007. – Vol. 691. – P. 121–125. – DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
2. Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process / P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačengaetis // *Mechanika*. – 2014. – Vol. 20 (6). – P. 590–595. – DOI: 10.5755/j01.mech.20.6.8664.
3. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2005. – Vol. 50 (1–2). – P. 1–78. – DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
4. Effect of friction stir processing on tribological performance of high carbon steel / S. H. Aldajah, O. O. Ajayi, G. R. Fenske, S. David // *Wear*. – 2009. – Vol. 267. – P. 350–355. – DOI: 10.1016/J.WEAR.2008.12.020.
5. Чурюмова И. А. Разработка технологий упрочнения болтовых отверстий в железнодорожных рельсах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. – Москва, 1991. – 28 с.
6. Воропаев В. В. Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20X13 при обработке трением с перемешиванием : дис. канд. техн. наук : 05.16.09. – Екатеринбург, 2021. – 169 с.
7. ГОСТ 4543–2016. Межгосударственный стандарт. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.
8. Zhang Z., Farahmand P., Kovacevic R. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high-power direct diode laser // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 109. – P. 686–699. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.114.
9. Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting / J. Rech, P. Arrazola, C. Claudin, C. Courbon, F. Pušavec, J. Kopac // *Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 62 (1). – P. 79–82. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.099.



10. Кузнецов В. П., Воропаев В. В., Скоробогатов А. С. Фрикционная поверхностная закалка сталей вращающимся инструментом : учебное пособие для студентов вуза / науч. ред. А. А. Попов ; Уральский федеральный ун-т имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2022. – 109 с.
11. ГОСТ 11371–78. Шайбы. Технические условия.