

**Received:** 27.10.2023

**Revised:** 14.12.2023

**Accepted:** 29.12.2023

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2023.6.132-144

## AN EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF THROUGH-DEPTH STRAIN DISTRIBUTION DURING FRICTIONAL TREATMENT OF A METASTABLE AUSTENITIC STEEL

L. S. Goruleva<sup>a),\*</sup>, S. M. Zadvorkin<sup>b)</sup>, D. I. Vichuzhanin<sup>c)</sup>, R. A. Savrai<sup>d)</sup>, and P. A. Skorynina<sup>e)</sup>

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

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  [sherlarisa@yandex.ru](mailto:sherlarisa@yandex.ru);  
 b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  [zadvorkin@imach.uran.ru](mailto:zadvorkin@imach.uran.ru);  
 c)  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru);  
 d)  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  [ras@imach.uran.ru](mailto:ras@imach.uran.ru);  
 e)  <https://orcid.org/0000-0002-8904-7600>  [polina.skorynina@mail.ru](mailto:polina.skorynina@mail.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [sherlarisa@yandex.ru](mailto:sherlarisa@yandex.ru)

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 362-3029

Frictional treatment, as a method of surface plastic deformation, forms a gradient hardened layer. In the case of metastable steels, this hardening is due, among other things, to the formation of strain-induced  $\alpha'$ -martensite. The most reliable information about the thickness of this hardened layer can be obtained by measuring the hardness on transverse sections. This paper compares strain distribution through the depth of the hardened layer, obtained from layer-by-layer phase analysis and finite element modeling, with the data of durametric studies for the AISI 321 metastable steel subjected to frictional treatment under various loads on the indenter. A satisfactory coincidence of the distributions of the  $\alpha'$ -phase concentration and hardness through the depth is observed only for the specimen subjected to frictional treatment at a maximum load of 400 N on the indenter. At the other loads on the indenter, the thickness of the layer containing  $\alpha'$ -martensite is lower than the thickness of the hardened layer estimated from the durametric studies. In contrast, it is shown that, for all the loads applied to the indenter during frictional treatment, the through-depth distributions of the calculated values of equivalent plastic strain obtained from finite element modeling agree satisfactorily with the experimental hardness values.

**Keywords:** austenitic metastable steels, frictional treatment, hardened layer, hardness, finite element modeling, phase composition

### Acknowledgment

*The work was performed under state assignment No. AAAA-A18-118020790148-1. The equipment of the Plastometriya shared research facilities (the IES UB RAS) was used in the study.*

### References

1. Odintsov, L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik* [Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation: Handbook.]. Mechanical Engineering Publ., Moscow, 1987, 329 p. (In Russian).
2. Savrai, R.A., Makarov, A.V., Malygina, I.Yu., Rogovaya, S.A., and Osintseva, A.L. Improving the strength of the AISI 321 austenitic stainless steel by frictional treatment. *Diagnostics*,

- Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, 5, 43–62. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.043-062. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2017-5/2017-5\\_149.html](http://dream-journal.org/issues/2017-5/2017-5_149.html)
3. Makarov, A.V., Skorynina, P.A., Osintseva, A.L., Yurovskikh, A.S., and Savrai, R.A. Improving the tribological properties of austenitic 12KH18N10T steel by nanostructuring frictional treatment. *Obrabotka Metallov (Tekhnologiya, Oborudovanie, Instrumenty)*, 2015, 4 (69), 80–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92. (In Russian).
  4. Makarov, A.V., Savrai, R.A., Skorynina, P.A., and Volkova, E.G. Development of methods for steel surface deformation nanostructuring. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, 62, 61–69. DOI: 10.1007/s11041-020-00529-w.
  5. Narkevich, N.A., Shulepov, I.A., and Mironov, Yu.P. Structure, mechanical, and tribotechnical properties of an austenitic nitrogen steel after frictional treatment. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, 118 (4), 399–406. DOI: 10.1134/S0031918X17020090.
  6. Makarov, A.V., Savrai, R.A., Pozdeeva, N.A., Smirnov, S.V., Vichuzhanin, D.I., Korshunov, L.G., and Malygina, I.Yu. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205 (3), 841–852. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025.
  7. Vichuzhanin, D.I., Makarov, A.V., Smirnov, S.V., Pozdeeva, N.A., and Malygina, I.Y. Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, 40 (6), 554–560. DOI: 10.3103/S1052618811050190.
  8. Wu, Y., Guelorget, B., Sun, Z., Déturche, R., and Retrait, D. Characterization of gradient properties generated by SMAT for a biomedical grade 316L stainless steel. *Materials Characterization*, 2019, 155, 109788. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109788.
  9. Smelyanskiy, V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of Parts Hardening by Surface Plastic Deformation]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2002, 300 p. (In Russian).
  10. Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Mitropolskaya, S.Yu., Vichuzhanin, D.I., and Solovyev, K.E. Change in magnetic properties of metastable austenitic steel due to elastoplastic deformation. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, 51, 423–428. DOI: 10.1007/s11041-010-9185-x.
  11. Goruleva, L.S., Zadvorkin, S.M., and Mushnikov, A.N. Effect of plastic deformation on the phase composition and electromagnetic characteristics of the 321N austenitic steel (08Kh18N10T). *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, 95–106. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.095-106. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2022-6/2022-6\\_387.html](http://dream-journal.org/issues/2022-6/2022-6_387.html)
  12. Putilova, E.A., Goruleva, L.S., Zadvorkin, S.M., Skorynina, P.A., Savrai, R.A., and Kryucheva, K.D. Evolution of the structure and physical-mechanical properties of metastable steel after surface frictional treatment with varying loading on the indenter. *Letters on Materials*, 2023, 13 (3), 191–196. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-3-191-196.
  13. Dorofeev, A.L. *Vikhrevye toki* [Eddy Currents]. Energiya Publ., Moscow, 1977, 72 p.
  14. Klyuev, V.V., ed. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-Destructive Testing, vol. 2]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2005, 688 p. (In Russian).
  15. Savrai, R.A. and Kogan, L.Kh. Effect of hardening frictional treatment on features of eddy current testing of fatigue degradation of metastable austenitic steel under gigacycle contact fatigue loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58 (8), 722–731. DOI: 10.1134/s1061830922080095.
  16. Silva, V.M.A., Camerini, A.C.G., Pardal, J.M., De Blás, J.C.G., and Pereira, G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, 7 (3), 395–401. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
  17. Liu, K., Zhao, Z., and Zhang, Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21 (8), 1772–1776. DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.

18. Mirkin, L.I. *Rentgenostrukturnyi kontrol mashinostroitelnykh materialov: spravochnik* [X-Ray Structural Control of Machine-Building Materials]. MGU Publ., Moscow, 1976, 134 p. (In Russian).
19. Smirnov, S.V., Pugacheva, N.B., and Myasnikova, M.V. Evaluating ultimate strains to fracture of the zones of a diffusion aluminide coating. *Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, 2014, 12, 17–22. (In Russian).
20. Smirnov, S.V., Myasnikova, M.V., and Igumnov, A.S. Determination of the local shear strength of a layered metal composite material with a ductile interlayer after thermocycling. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, 4, 46–56. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.046-056. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4\\_88.html](http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_88.html)–2016. Iss. 4. – P. 46-56
21. Hu, J., Kulagin, R., Ivanisenko, Yu., Baretzky, B., and Zhang, H. Finite element modeling of Conform-HPTE process for a continuous severe plastic deformation path. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 55, 373–380. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.052.
22. Blumenstein, V.Yu, Mahalov, M.S., and Shirokolobova, A.G. Finite element modeling of strengthening process by means of surface plastic deformation using a multiradius tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 253, 012017. DOI: 10.1088/1757-899x/253/1/012017.
23. Kragelskiy, I.V. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1968, 480 p.
24. Johnson, K.L. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya* [Mechanics of Contact Interaction]. Mir Publ., Moscow, 1989, 509 p.

Подана в журнал: 27.10.2023

УДК 669.14:621.787.4

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.132-144

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПО ГЛУБИНЕ ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Л. С. Горюлева<sup>а), \*</sup>, С. М. Задворкин<sup>б)</sup>, Д. И. Вичужанин<sup>в)</sup>, Р. А. Саврай<sup>г)</sup>, П. А. Скорынина<sup>д)</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН,  
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия*

- <sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  [sherlarisa@yandex.ru](mailto:sherlarisa@yandex.ru);  
<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  [zadvorkin@imach.uran.ru](mailto:zadvorkin@imach.uran.ru);  
<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru);  
<sup>г)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  [ras@imach.uran.ru](mailto:ras@imach.uran.ru);  
<sup>д)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8904-7600>  [polina.skorynina@mail.ru](mailto:polina.skorynina@mail.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [sherlarisa@yandex.ru](mailto:sherlarisa@yandex.ru)  
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия  
Тел.: +7 (343) 362-30-29

Фрикционная обработка, как один из методов поверхностной пластической деформации, приводит к формированию градиентного упроченного слоя. В случае метастабильных сталей это упрочнение обусловлено, кроме всего прочего, образованием  $\alpha'$ -мартенсита деформации. Наиболее достоверную информацию о толщине этого упроченного слоя можно получить, проводя измерение твердости на поперечных шлифах. В настоящей работе проведено сопоставление распределений деформации по глубине упроченного слоя, полученных по результатам послойного фазового анализа и конечно-элементного моделирования, с данными дюрOMETрических исследований для метастабильной стали AISI 321, подвергнутой фрикционной обработке при различных нагрузках на индентор. Установлено, что удовлетворительное совпадение распределений концентрации  $\alpha'$ -фазы и твердости по глубине наблюдается только для образца, подвергнутого фрикционной обработке при максимальной нагрузке на индентор 400 Н. При остальных нагрузках на индентор толщина слоя, содержащего  $\alpha'$ -мартенсит, меньше толщины упроченного слоя, оцененного по результатам дюрOMETрических исследований. В отличие от этого, показано, что для всех примененных при фрикционной обработке нагрузок на индентор наблюдается удовлетворительное согласие распределений по глубине расчетных величин эквивалентной пластической деформации, полученных в результате конечно-элементного моделирования, и экспериментальных значений твердости.

**Ключевые слова:** аустенитные метастабильные стали, фрикционная обработка, упроченный слой, твердость, конечно-элементное моделирование, фазовый состав

### 1. Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД), в том числе такая его разновидность, как фрикционная обработка, широко используется для повышения уровня прочности и других эксплуатационных свойств изделий [1–5]. ППД приводит к формированию градиентного упроченного поверхностного слоя, в котором параметры напряженно-деформированного состояния и физико-механические характеристики меняются по глубине упроченного слоя [2–4, 6–9]. В случае метастабильных аустенитных сталей свойства этого слоя обусловлены не только его наклепом, но и образованием в нем  $\alpha'$ -мартенсита деформа-

ции [3–4, 10–12]. Толщина упрочненного слоя во многом определяет функциональные свойства изделий, подвергнутых ППД.

Наиболее достоверные сведения о толщине поверхностного упрочненного слоя можно получить путем измерений твердости на поперечных шлифах, как это продемонстрировано, например, в работе [12]. Но этот способ имеет характерные для всех разрушающих методов контроля недостатки: невозможность эксплуатации проконтролированного изделия и, соответственно, проведения контроля каждого изделия, обработанного ППД, а также большая трудоемкость испытаний.

Для получения информации о состоянии поверхностных слоев изделий, в том числе о толщине упрочненного слоя, широко применяется неразрушающий вихретоковый метод [13–17], свободный от указанных недостатков. В случае метастабильных аустенитных сталей достоверную вихретоковую оценку толщины упрочненного с помощью ППД слоя можно обеспечить только при учете влияния  $\alpha'$ -мартенсита деформации на показания вихретокового прибора. Это обусловлено тем, что аустенит и  $\alpha'$ -мартенсит деформации имеют существенно различные электрические и особенно магнитные характеристики. В частности, магнитная проницаемость, которая является одним из главных факторов, определяющих толщину скин-слоя материала, у ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы многократно больше, чем у парамагнитного аустенита. При этом концентрация  $\alpha'$ -мартенсита в градиентном упрочненном слое не постоянна, а уменьшается с глубиной в соответствии с уменьшением степени деформации. Например, для стали марки AISI 321 (или 321H по стандарту ASTM A240/A240M-1, российский аналог этой стали – 08X18H10T) в работе [11] зависимость объемного содержания  $\alpha'$ -мартенсита  $C$  (%) от степени пластической деформации растяжением  $\varepsilon$  аппроксимирована полиномом 2-й степени:

$$C = 0,63 + 51,64 \times \varepsilon + 285,61 \times \varepsilon^2. \quad (1)$$

Воспользовавшись экспериментальными данными [11], можно также получить зависимость  $\varepsilon$  от  $C$ :

$$\varepsilon = 0,004 + 0,010 \times C - 6,587 \times 10^{-5} \times C^2. \quad (2)$$

Таким образом, путем послойного анализа содержания  $\alpha'$ -мартенсита в упрочненных ППД изделиях из аустенитных сталей можно судить о распределении деформации в их поверхностных слоях и, соответственно, о толщине упрочненного слоя. Следует учесть, что выражения (1) и (2) имеют физический смысл, если  $\varepsilon < 0,51$ , поскольку концентрация  $\alpha'$ -фазы не может превышать 100 %. Очевидно, для метода послойного фазового анализа характерны те же недостатки, что и для измерения твердости на поперечных шлифах. Кроме того, содержание  $\alpha'$ -мартенсита деформации зависит не только от величины деформации, но и от ее вида [10]. Это обусловлено разными атомарными объемами в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе: параметр ОЦК-решетки  $\alpha$ -железа равен  $2,87 \text{ \AA}$ , а параметр ГЦК-решетки  $\gamma$ -железа –  $3,57 \text{ \AA}$  [18]. Учитывая, что на элементарную ячейку ОЦК-решетки приходится 2 атома, а на элементарную ячейку ГЦК-решетки – 4 атома, получаем, что на один атом в  $\alpha$ -железе приходится  $11,82 \text{ \AA}^3$ , а в  $\gamma$ -железе – на 4 % меньше ( $11,37 \text{ \AA}^3$ ). Соответственно, деформирование аустенитных сталей растяжением способствует превращению  $\gamma \rightarrow \alpha'$ , а сжатие затрудняет этот фазовый переход. В работе [11] образцы исследовали после растяжения.

В настоящее время для анализа различных процессов как объемного, так и поверхностного пластического деформирования широко используются методы конечно-элементного моделирования [6–7, 19–22]. Они позволяют существенно сократить материальные и трудовые затраты, а также время для получения необходимой информации о напряженно-деформированном состоянии объекта исследования, в том числе подвергнутого фрик-



ционной обработке. Однако в этих работах моделировали напряженно-деформированное состояние материалов, не претерпевающих фазовых превращений при деформации.

В настоящей работе на примере образцов метастабильной аустенитной стали AISI 321, подвергнутых фрикционной обработке алмазным индентором диаметром 3 мм при различных нагрузках на индентор, проведено сопоставление распределения деформации по глубине упрочненного слоя и, соответственно, оценок толщины этого слоя, полученных по результатам послойного фазового анализа и конечно-элементного моделирования, с данными, представленными в работе [12], где выполнены дюрметрические исследования этих же образцов.

## 2. Результаты послойного фазового анализа

Как уже было указано, исследования проводили на тех же образцах стали AISI 321, что и в работе [12]. В этой статье описаны химический состав образцов и методика их изготовления и фрикционной обработки. Для рентгенофазового анализа были взяты образцы, подвергнутые фрикционной обработке при нормальной нагрузке на алмазный индентор 50, 150, 250 и 400 Н.

Образцы подвергали послойной электролитической полировке до тех пор, пока не стравится весь упрочненный слой. На начальных этапах полировки удаляли слои толщиной по 2...5 мкм, чтобы более подробно изучить фазовый состав тех участков, где концентрация  $\alpha'$ -мартенсита максимальна. На последующих этапах удаляли слои толщиной по 15...20 мкм. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с использованием монохроматизированного  $K_{\alpha}$ -излучения хромового анода. Фазовый состав образцов с той стороны, которая подвергалась ППД, определяли непосредственно после фрикционной обработки и после каждого этапа электролитического травления. Использовали метод гомологических пар [18]. Толщина анализируемого слоя, дающего 95 % интенсивности рентгеновских рефлексов, составляла примерно 9 мкм. То есть содержание  $\alpha'$ -мартенсита деформации определялось интегрально по слою толщиной 9 мкм.

Результаты определения содержания  $\alpha'$ -мартенсита деформации на различной глубине показаны на рис. 1. Видно, что при фрикционной обработке с нагрузкой на индентор 50 Н заметное количество  $\alpha'$ -мартенсита деформации ( $\geq 2$  %) содержится в слое толщиной примерно 15 мкм, с нагрузкой 150 Н – около 40 мкм, с нагрузкой 250 Н – примерно 250 мкм, а с нагрузкой 400 Н – примерно 500 мкм.

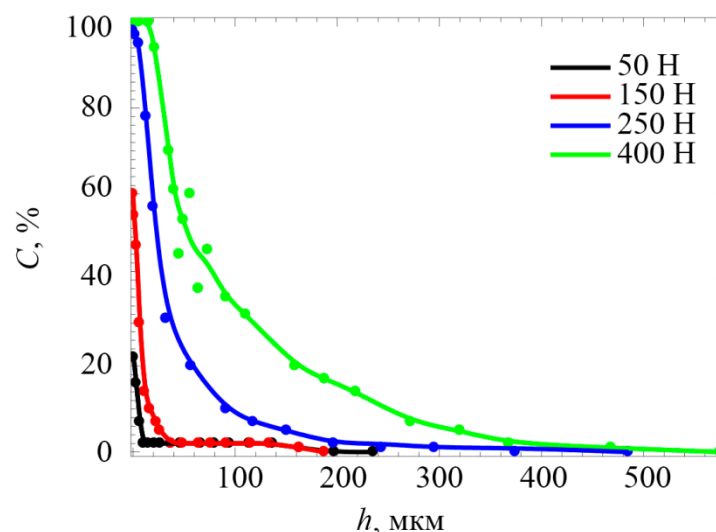


Рис. 1. Распределение содержания  $\alpha'$ -мартенсита  $C$  в поверхностном слое стали AISI 321, подвергнутой фрикционной обработке при различных нагрузках по глубине  $h$

На рис. 2 приведено сопоставление данных работы [12] по измерению твердости HV 0,025 на поперечных шлифах образцов после ППД и на поверхности (для получения значений твердости при  $h = 0$ ) с результатами расчета по формуле (2) степени их деформации на различном расстоянии от поверхности. Следует отметить, что полученным в работе [12] числам твердости соответствует величина диагонали отпечатка пирамиды Виккерса порядка 10 мкм. Таким образом, локальность измерений твердости и рентгенофазового анализа примерно одинакова.

Как видно из рис. 2, удовлетворительное согласие зависимостей  $HV(h)$  и  $\varepsilon(h)$  наблюдается только для образца, подвергнутого фрикционной обработке при максимальной нагрузке на индентор 400 Н. В остальных случаях толщина слоя, содержащего  $\alpha'$ -мартенсит, в несколько раз меньше толщины упрочненного ППД слоя с повышенной относительно исходного состояния материала твердостью. Это обстоятельство может быть обусловлено тем фактом, что, как отмечено выше, уравнения регрессии (1) и (2) получены для случая одноосного растяжения, в то время как в результате ППД поверхность материала находится в более сложном напряженно-деформированном состоянии [9], а концентрация  $\alpha'$ -мартенсита в метастабильных сталях зависит от вида деформирования.

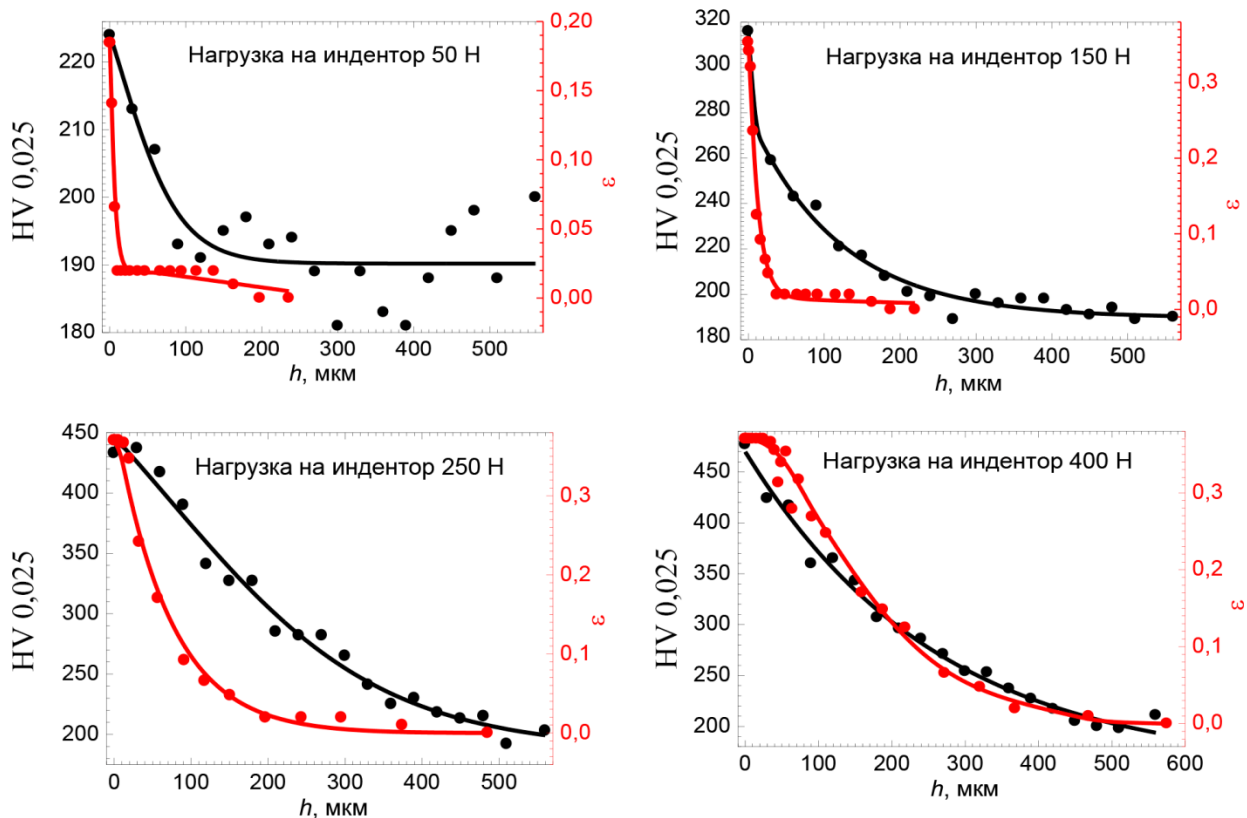


Рис. 2. Сопоставление результатов измерения твердости HV 0,025 (●), взятых из работы [12], и данных расчета степени деформации  $\varepsilon$  (●) по содержанию  $\alpha'$ -мартенсита на различной глубине  $h$  образцов стали AISI 321, подвергнутых фрикционной обработке при варьировании нагрузки на алмазный индентор

### 3. Конечно-элементное моделирование

Необходимая для построения конечно-элементной модели диаграмма «напряжение – деформация» стали марки AISI 321 представлена в работе [11]. В частности, согласно [11], условный предел текучести испытанных образцов стали равен 195 МПа, а временное сопротивление разрыву – 615 МПа.

Конечно-элементное моделирование процесса фрикционной обработки скользящим полусферическим индентором при различных нагрузках на индентор проводили, используя пакет Ansys. Конечно-элементная модель процесса приведена на рис. 3. Для наглядности сферический индентор и образец показаны в разрезе. При моделировании процесса фрикционной обработки в приповерхностных объемах металла сетку конечных элементов сгущали у поверхности. Наименьшая высота элемента составила 2,5 мкм. Это примерно в 4 раза меньше, чем локальность дюрOMETрических измерений и рентгенофазового анализа. Для экономии вычислительных ресурсов и уменьшения времени расчетов размеры элементов увеличивали по мере удаления от обрабатываемой поверхности, так что наибольшая высота элемента у основания образца составила 52,2 мкм. Сферический индентор в модели рассматривали как абсолютно жесткое тело, материал образца – как изотропный, упругопластический с деформационным упрочнением. Использовали ассоциированный закон пластического течения и условие текучести Мизеса. Использовали условие трения Амонтона – Кулона, коэффициент трения принимали равным 0,1 [23]. В качестве граничных условий задавали соответствующую нагрузку на индентор  $P$  и его перемещение  $u$  (рис. 1).

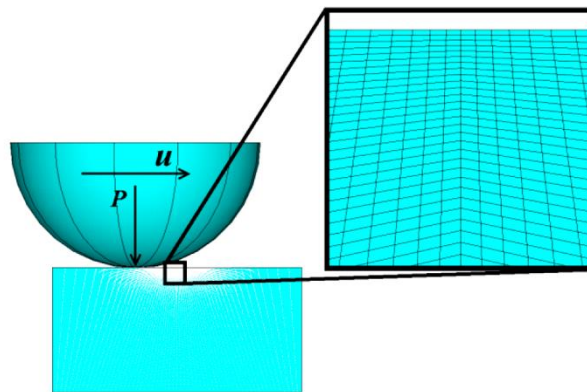


Рис. 3. Конечно-элементная модель процесса сканирования индентором

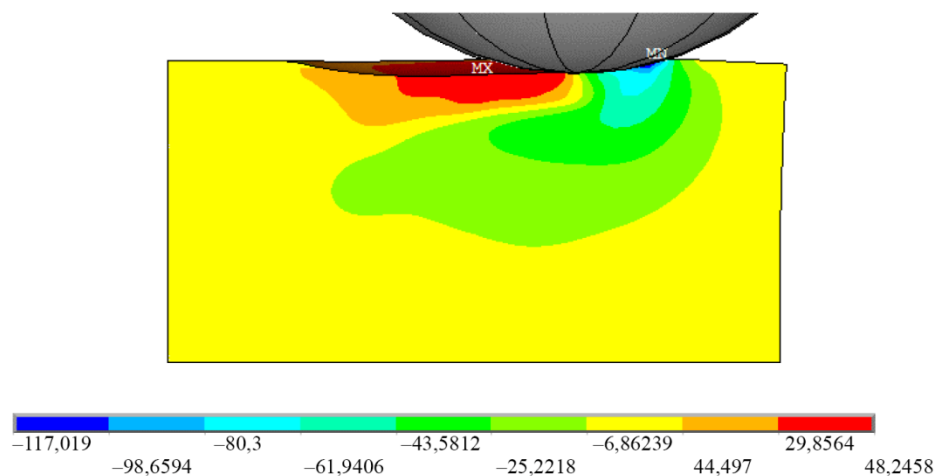


Рис. 4. Распределение средних нормальных напряжений по сечению образца при фрикционной обработке с нагрузкой на индентор 250 Н

Полученные результаты математического моделирования процесса деформирования металла скользящим сферическим индентором (макроскопический масштабный уровень) хорошо согласуются с известными представлениями И. В. Крагельского [23], согласно которым в зоне фрикционного металлического контакта перед фронтом движущейся твердой микро-неровности, внедренной в поверхность контртела (микроскопический масштабный уровень),



создается зона сжимающих напряжений, в которой материал подвергается интенсивной пластической деформации в условиях, близких к сдвигу под давлением (см. рис. 4, где в качестве примера показано распределение средних нормальных напряжений по сечению образца при нагрузке на индентор 250 Н).

Конечно-элементное моделирование позволило получить распределение эквивалентной пластической деформации ( $\epsilon_{eq}$ ) по глубине при различных нагрузках на индентор. Величина эквивалентной пластической деформации при моделировании в пакете Ansys рассчитывается по формуле

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ ,  $\epsilon_{33}$  – главные деформации.

На рис. 5 в качестве примера представлено распределение эквивалентной пластической деформации после сканирования при нагрузке на индентор 250 Н.

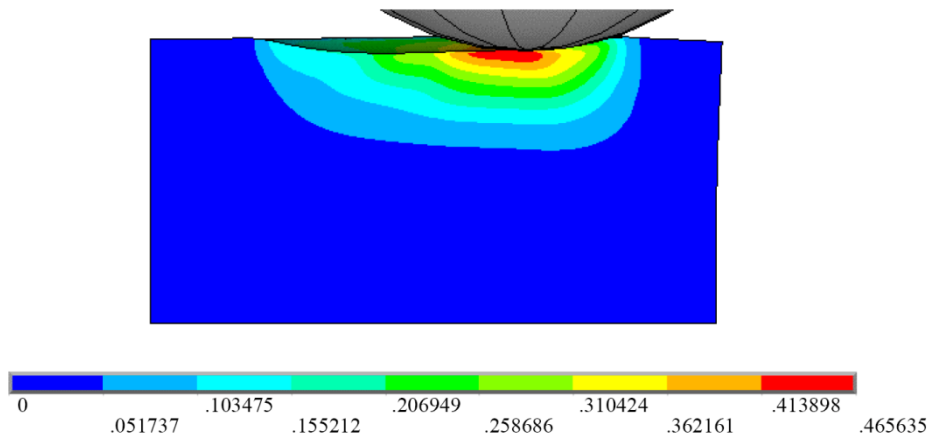


Рис. 5. Распределение эквивалентной пластической деформации по сечению образца при фрикционной обработке с нагрузкой на индентор 250 Н

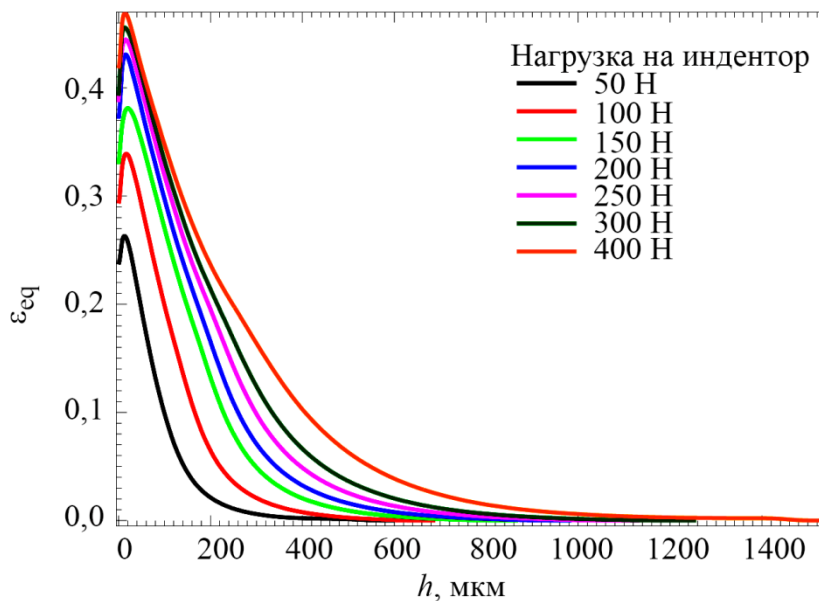


Рис. 6. Распределение эквивалентной пластической деформации по глубине при варьировании нагрузки на индентор при фрикционной обработке

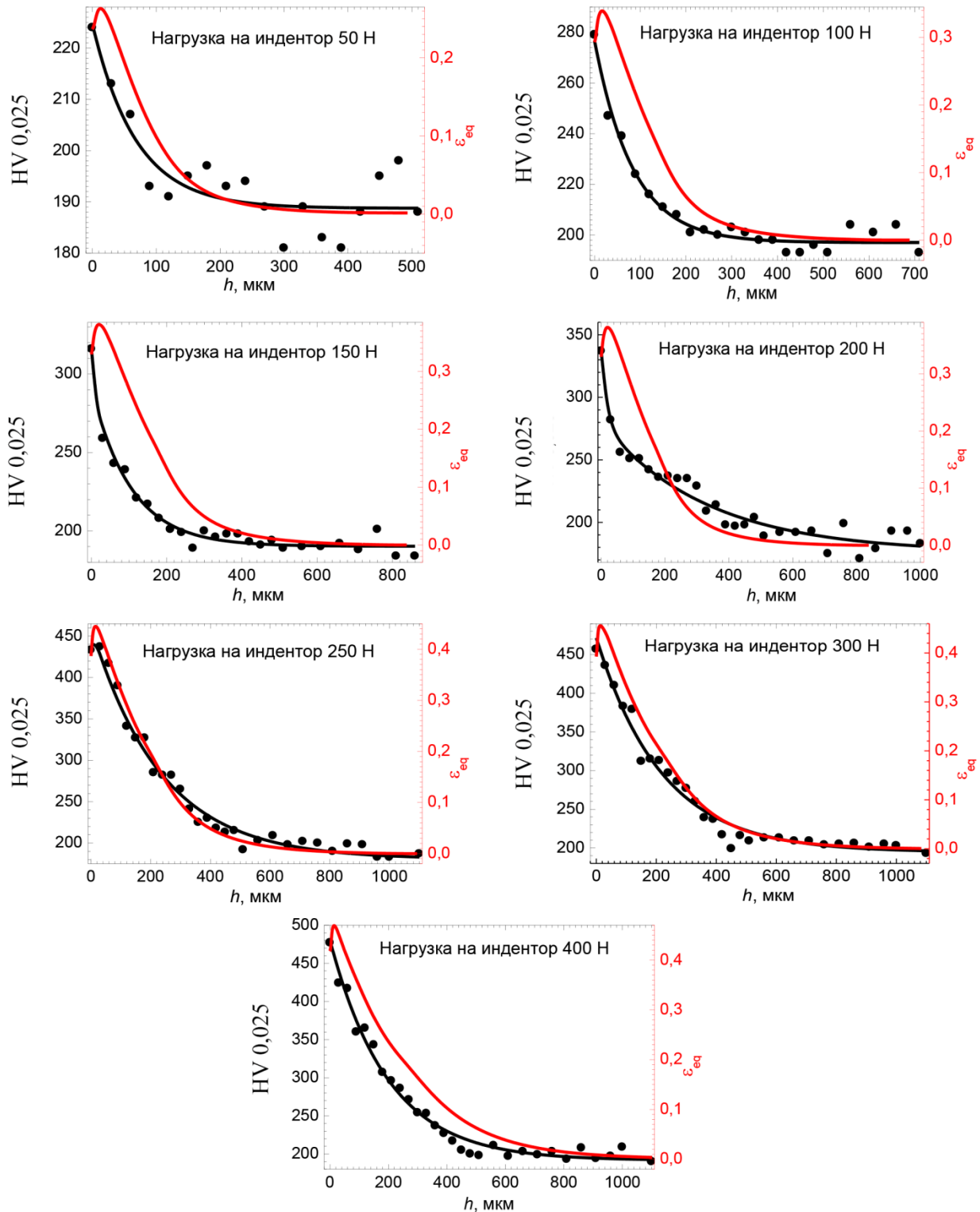


Рис. 7. Сопоставление распределений экспериментальных значений твердости HV 0,025 (•), взятых из работы [12], и расчетных величин эквивалентной деформации  $\epsilon_{eq}$  (—) по глубине  $h$  образцов стали AISI 321, подвергнутых фрикционной обработке при различной нагрузке на алмазный индентор

По результатам конечно-элементного моделирования процесса фрикционной обработки построены распределения величины  $\epsilon_{eq}$  по глубине поверхностного слоя при различной нагрузке на индентор (рис. 6).

Согласно результатам конечно-элементного моделирования, максимальная  $\varepsilon_{\text{eq}}$  наблюдается не непосредственно на поверхности, а на глубине  $h \approx 20$  мкм. При увеличении нагрузки на индентор с 50 Н до 400 Н максимальное значение  $\varepsilon_{\text{eq}}$  увеличивается в 2 раза. Достигнув максимума, эквивалентная степень деформации начинает уменьшаться с увеличением расстояния от поверхности образцов. Такой характер зависимости  $\varepsilon_{\text{eq}}(h)$  соответствует современным представлениям о напряженно-деформированном состоянии поверхностных слоев материала при ППД [24].

Из рис. 6 видно, что при нагрузках на индентор 200...400 Н в поверхностных слоях толщиной примерно 150 мкм зависимости величин эквивалентной пластической деформации от глубины близки. Таким образом, рост нормальной нагрузки на индентор выше 200 Н слабо влияет на деформированное состояние поверхностного слоя материала толщиной до 150 мкм. При этом уровень эквивалентной деформации снижается до величины, характерной для исходного (до ППД) состояния исследованной стали, при нагрузке на индентор 200 Н на глубине примерно 600 мкм, а при нагрузке на индентор 400 Н – около 1000 мкм. Таким образом, оценка толщины упрочненного слоя по величине  $\varepsilon_{\text{eq}}$  при нагрузке на индентор 50 Н дает значение примерно 400 мкм, а при нагрузке 400 Н – около 1000 мкм.

На рис. 7 приведено сопоставление экспериментальных значений твердости и расчетных величин эквивалентной деформации  $\varepsilon_{\text{eq}}$  на различном расстоянии от поверхности исследованных образцов. Как видно, наблюдается удовлетворительное согласие зависимостей  $HV(h)$  и  $\varepsilon_{\text{eq}}(h)$  для всех использованных режимов фрикционной обработки. Расхождение между этими зависимостями можно объяснить, в частности, значительно большей локальностью конечно-элементной модели.

#### 4. Заключение

Проведено исследование распределения  $\alpha'$ -мартенсита деформации в поверхностных слоях метастабильной аустенитной стали AISI 321 (российский аналог – 08X18H10T), подвергнутой фрикционной обработке алмазным индентором при варьировании нормальной нагрузки на индентор в диапазоне 50...400 Н. Показано, что при фрикционной обработке с нагрузкой на индентор 50 Н заметное количество  $\alpha'$ -мартенсита деформации ( $\geq 2$  %) содержится в слое толщиной примерно 15 мкм, с нагрузкой 150 Н – около 40 мкм, с нагрузкой 250 Н – примерно 250 мкм, а с нагрузкой 400 Н – примерно 500 мкм. Удовлетворительное соответствие распределений концентрации  $\alpha'$ -фазы (а также, соответственно, степени деформации, рассчитанной по этой величине) и твердости по глубине наблюдается только для образца, подвергнутого фрикционной обработке при максимальной нагрузке на индентор 400 Н. В остальных случаях толщина слоя, содержащего  $\alpha'$ -мартенсит, в несколько раз меньше толщины упрочненного ППД слоя с повышенной относительно исходного состояния материала твердостью.

Проведено конечно-элементное моделирование распределения эквивалентной пластической деформации по глубине упрочненного слоя. Установлено, что максимальная величина эквивалентной деформации наблюдается не непосредственно на поверхности образца, а на глубине около 20 мкм. Расчетная толщина упрочненного слоя при нагрузке на индентор 50 Н составила примерно 400 мкм, а при нагрузке 400 Н – около 1000 мкм. Для всех примененных при фрикционной обработке нагрузок на индентор наблюдается удовлетворительное соответствие распределений по глубине расчетных величин эквивалентной пластической деформации и экспериментальных значений твердости.

#### Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А18-118020790148-1. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.*

## Литература

1. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник. – М. : Машиностроение, 1987. – 329 с.
2. Improving the strength of the AISI 321 austenitic stainless steel by frictional treatment / R. A. Savrai, A. V. Makarov, I. Yu. Malygina, S. A. Rogovaya, A. L. Osintseva // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 5. – P. 43–62. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.043-062. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2017-5/2017-5\\_149.html](http://dream-journal.org/issues/2017-5/2017-5_149.html)
3. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева, А. С. Юровских, Р. А. Саврай // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 80–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92.
4. Development of methods for steel surface deformation nanostructuring / A. V. Makarov, R. A. Savray, P. A. Skorynina, E. G. Volkova // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2020. – Vol. 62. – P. 61–69. – DOI: 10.1007/s11041-020-00529-w.
5. Narkevich N. A., Shulepov I. A, Mironov Yu. P. Structure, mechanical, and tribotechnical properties of an austenitic nitrogen steel after frictional treatment // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2017. – Vol. 118 (4). – P. 399–406. – DOI: 10.1134/S0031918X17020090.
6. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension / A. V. Makarov, R. A. Savrai, N. A. Pozdeeva, S. V. Smirnov, D. I. Vichuzhanin, L. G. Korshunov, I. Yu. Malygina // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, iss. 3. – P. 841–852. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025.
7. Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter / D. I. Vychuzhanin, A. V. Makarov, S. V. Smirnov, N. A. Pozdeeva, I. Y. Malygina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2011. – Vol. 40 (6). – P. 554–560. – DOI: 10.3103/S1052618811050190.
8. Characterization of gradient properties generated by SMAT for a biomedical grade 316L stainless steel / Y. Wu, B. Guelorget, Z. Sun, R. D eturche, D. Retraint // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 155. – P. 109788. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109788.
9. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.
10. Change in magnetic properties of metastable austenitic steel due to elastoplastic deformation /  . S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, S. Yu. Mitropolskaya, D. I. Vichuzhanin, K. E. Solovyev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2009. – Vol. 51. – P. 423–428. – DOI: 10.1007/s11041-010-9185-x.
11. Goruleva L. S., Zadvorkin S. M., Mushnikov A. N Effect of plastic deformation on the phase composition and electromagnetic characteristics of the 321N austenitic steel (08Kh18N10T) // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2022. – Iss. 6. – P. 95–106. – DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.095-106. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2022-6/2022-6\\_387.html](http://dream-journal.org/issues/2022-6/2022-6_387.html)
12. Evolution of the structure and physical-mechanical properties of metastable steel after surface frictional treatment with varying loading on the indenter / E. A. Putilova, L. S. Goruleva, S. M. Zadvorkin, P. A. Skorynina, R. A. Savrai, K. D. Krucheva // *Letters on Materials*. – 2023 – Vol. 13 (3). – P. 191–196. – DOI: 10.22226/2410-3535-2023-3-191-196.
13. Дорофеев А. Л. Вихревые токи. – М. : Энергия, 1977. – 72 с.
14. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 688 с. – Т. 2.
15. Savrai R. A., Kogan L. Kh. Effect of hardening frictional treatment on features of eddy current testing of fatigue degradation of metastable austenitic steel under gigacycle contact fatigue

- loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58 (8). – P. 722–731. – DOI: 10.1134/s1061830922080095.
16. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel / V. M. A. Silva, C. G. Camerini, J. M. Pardal., J. G. De Blas, G. R. Pereira // Journal of Materials Research and Technology. – 2018. – Vol. 7, iss. 3. – P. 395–401. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
17. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI stainless steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21, iss. 8. – P. 1772–1776. – DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.
18. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов : справочник. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.
19. Смирнов С. В., Пугачева Н. Б., Мясникова М. В. Оценка прочности зон диффузионного алюминидного покрытия // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 12. – С. 17–22.
20. Smirnov S. V., Myasnikova M. V., Igumnov A. S. Determination of the local shear strength of a layered metal composite material with a ductile interlayer after thermocycling // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2016. – Iss. 4. – P. 46–56. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.046-056. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4\\_88.html](http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_88.html)–2016. Iss. 4. – P. 46-56
21. Finite element modeling of Conform-HPTE process for a continuous severe plastic deformation path / J. Hu, R. Kulagin, Yu. Ivanisenko, B. Baretzky, H. Zhang // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 55. – P. 373–380. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.052.
22. Finite element modeling of strengthening process by means of surface plastic deformation using a multiradius tool / V. Yu Blumenstein, M. S. Mahalov, A. G Shirokolobova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 253. – 012017. – DOI: 10.1088/1757-899x/253/1/012017.
23. Крагельский И. В. Трение и износ. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
24. Джонсон К. Л. Механика контактного взаимодействия / пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 510 с.