

INFLUENCE OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON THE HARDENED LAYER CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED TOOL STEEL HSS M2

*Daniil Valerjevich Mamontov^{1,2a}, Ivan Dmitrievich Sklizkov¹,
Alexander Vladislavovich Asylbaev¹, Ruslan Karimovich Vafin¹*

¹ Ufa State Aviation Technical University, Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

² Technopark of Aviation Technologies, Tramvaynaya Str. 5, building 1, Ufa, 450027, Russia

^a dany.mamontow@yandex.ru

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of the effect of severe plastic deformation of tool steel HSS M2 on the surface hardness and depth of the hardened layer after nitriding in a glow discharge plasma. For the experiments, two batches of samples were prepared, of which one batch underwent SPD processing, and the second did not undergo any preliminary processing. After the experiments, studies were carried out to measure the hardness along the depth of the hardened layer by the Vickers method. The research results are presented and analyzed. In the course of the analysis, it was found that the depth of the hardened layer depends on both the nitriding time and the initial structure of the steel. In turn, the surface hardness changes insignificantly from an increase in the nitriding time and the addition of preliminary SPD.

KEYWORDS

High speed steel; ion nitriding; implantation; microhardness.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

*Даниил Валерьевич Мамонтов^{1,2a}, Иван Дмитриевич Склизков¹,
Александр Владиславович Асылбаев¹, Руслан Каримович Вафин¹*

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

² Технопарк авиационных технологий, Россия, 450027, Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1

^a dany.mamontow@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования влияния интенсивной пластической деформации (ИПД) инструментальной стали Р6М5 на твердость поверхности и глубину упрочненного слоя после азотирования в плазме тлеющего разряда. Для проведения экспериментов подготавлива-

лись две партии образцов, из которых одна партия предварительно проходила ИПД обработку, а вторая не проходила никаких предварительных обработок. После экспериментов проводились исследования по измерению твердости по глубине упрочненного слоя методом Виккерса. Приведены и проанализированы результаты исследования. В ходе анализа выяснено, что глубина упрочненного слоя зависит как от времени азотирования, так и от изначальной структуры стали. В свою очередь, поверхностная твердость от увеличения времени азотирования и добавления предварительной ИПД изменяется незначительно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Быстрорежущая сталь; ионное азотирование; имплантация; микротвердость.

Введение

С постоянным развитием науки, техники и технологий к используемым материалам предъявляются все более высокие требования с точки зрения механических и эксплуатационных свойств. В связи с этим возникает необходимость использования дорогостоящих материалов с требуемым набором свойств или структурная модификация уже используемых материалов путем термической, химико-термической или механической обработки [1–5].

Одним из эффективных методов химико-термической обработки в машиностроении является технология ионного азотирования. В основном это связано с преимуществами ионного азотирования, которое отличает его от аналогичных методов. За счет ионного азотирования обрабатываемые детали и инструменты повышают свои механические и эксплуатационные свойства: прочность, твердость, износостойкость, устойчивость к царапинам, коррозионную стойкость, усталостную стойкость и жаростойкость [6]. Однако у данного метода есть один значительный недостаток – низкая скорость диффузии.

Как известно, на диффузию атомов в металлах большое влияние оказывают различные структурные дефекты – отклонения структуры решетки от идеальной. С увеличением структурных дефектов скорость диффузии в металле также увеличивается. Однако, наряду со структурными дефектами, на диффузию также влияет размер зерна металла: чем мельче зерно, тем выше скорость диф-

фузии [7]. Поэтому для увеличения скорости диффузии в металлах в последнее время все большее распространение получили методы поверхностной пластической деформации (ППД). Одним из таких методов является метод интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК), он заключается в деформации металла двумя одновременно действующими силами: сжимающей и крутильной деформацией (рис. 1, а).

Целью данной работы является исследование влияния предварительной интенсивной пластической деформации быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 на характеристики упрочненного слоя после ионного азотирования в плазме тлеющего разряда.

1. Методика экспериментальных исследований

В качестве материалов для исследования ионного азотирования была выбрана инструментальная сталь Р6М5. Для исследования влияния интенсивной пластической деформации стали на характеристики упрочненного слоя после ионного азотирования на поверхности половины образцов предварительно была создана ультрамелкозернистая структура при помощи ИПДК. Для проведения процесса ИПДК образцы, имеющие форму диска диаметром 20 мм и толщиной 3 мм были подвергнуты холодной осадке на 43% и кручению на 1,5 оборота при гидростатическом давлении 4 ГПа на установке «СКРУЖ-200», согласно схеме на рис. 1, а.

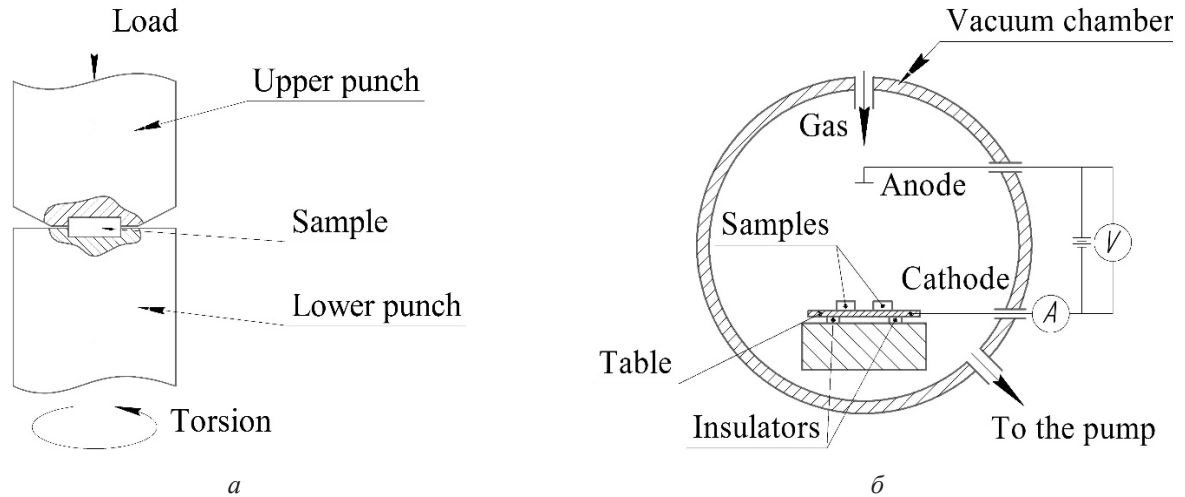


Рис. 1. Схемы процессов:
a – интенсивная пластическая деформация кручением; б – ионное азотирование в тлеющем разряде

Fig. 1. Schemes of processes:
a – severe plastic deformation by torsion; б – ion nitriding in a glow discharge

Ионное азотирование в плазме тлеющего разряда проводилась в модернизированной вакуумной установке ЭЛУ-5 (рис. 1), предназначенной для проведения термической и химико-термической обработок. Перед обработкой в вакуумной камере проводилась ионная очистка поверхности образцов в течение 15 мин в атмосфере аргона при давлении $p = 5$ Па. Ионное азотирование проводили в газовой смеси из аргона, азота и водорода ($50\% \text{ Ar} + 35\% \text{ N}_2 + 15\% \text{ H}_2$) при давлении газа $p = 200$ Па и температуре $T = 450$ °С в течение 2, 4 и 6 часов.

Исследование микротвердости поверхностного слоя азотированных образцов проводили по методу Виккерса на наклонных шлифах (угол 7°) с помощью автоматического твердомера EMCO-Test DuraScan 50. Для выявления микроструктуры исследуемые образцы подвергались химическому травлению в течение 10 с раствором кислоты: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (80 мл), HNO_3 (10 мл), HCl (10 мл) и $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$ (1 г). Оптические снимки микроструктур проводились с помощью микроскопа Olympus GX51.

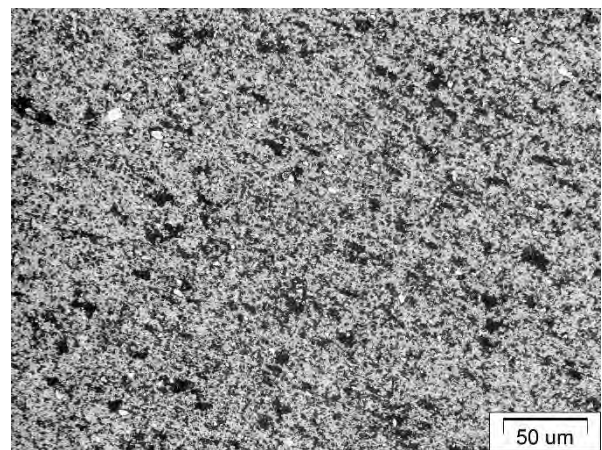
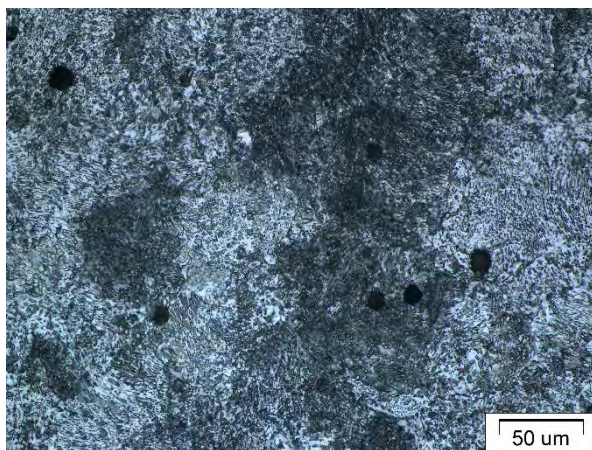


Рис. 2. Оптические снимки микроструктуры Р6М5:
a – исходная структура; б – УМЗ структура

Fig. 2. Optical images of the HSS M2 microstructure:
a – initial structure; б – UFG structure

2. Результаты экспериментальных исследований

Для исследования влияния интенсивной пластической деформации стали на поверхностную твердость и глубину упрочненного слоя инструментальной стали Р6М5 после ионного азотирования, были подготовлены две партии образцов, имеющих различную предварительную механическую обработку: 1 партия образцов не проходила никакую предварительную обработку, вторая пар-

тия предварительно проходила обработку ИПДК.

В ходе исследований было получено распределение твердости упрочненного слоя по глубине для образцов из инструментальной быстрорежущей стали с предварительной ИПД обработкой и без нее (рис. 3–5) после ионного азотирования в плазме тлеющего разряда в течении $t = 2, 4$ и 6 часов. Результаты исследований представлены на рисунках.

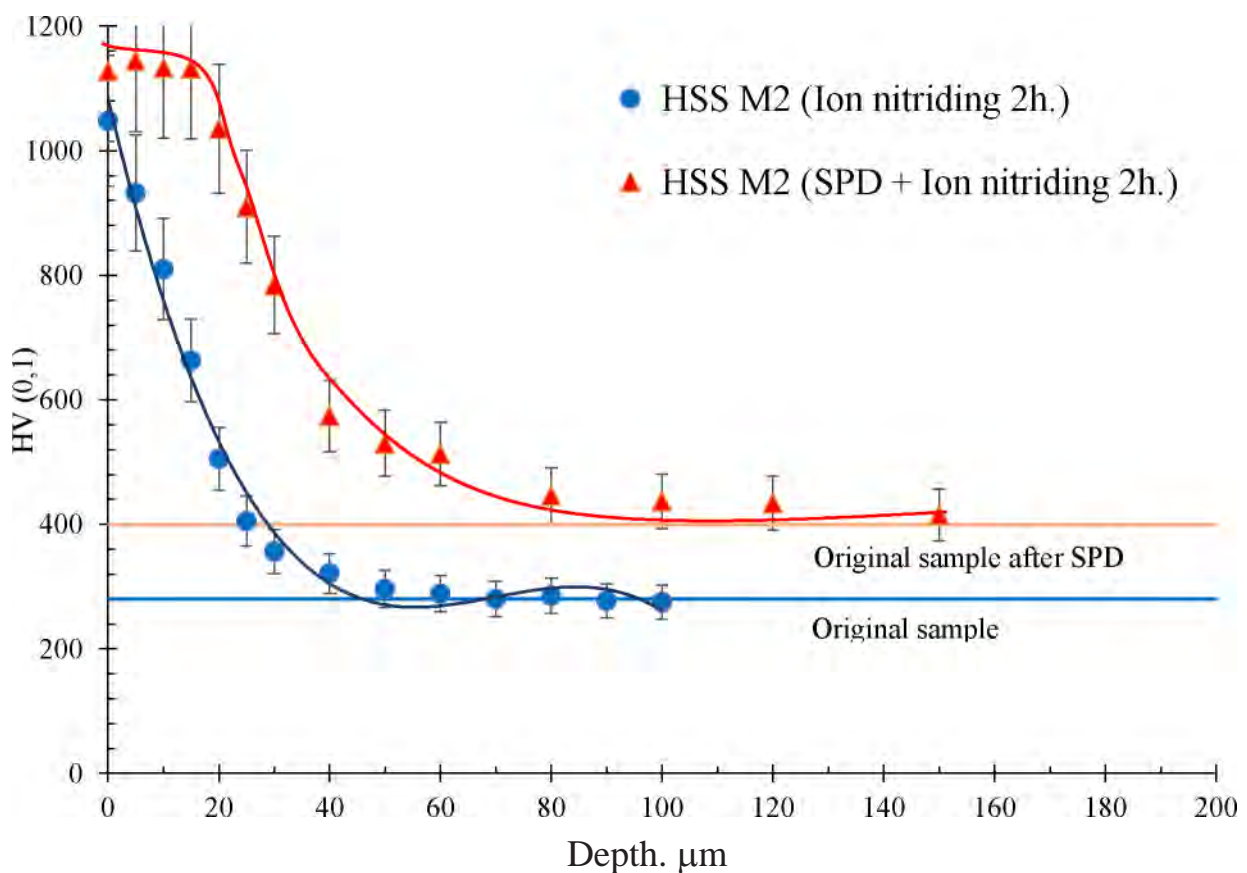


Рис. 3. Зависимость HV от глубины упрочненного слоя.
Время обработки 2 часа

Fig. 3. Dependence of HV on the depth of the hardened layer.
Processing time 2 hours

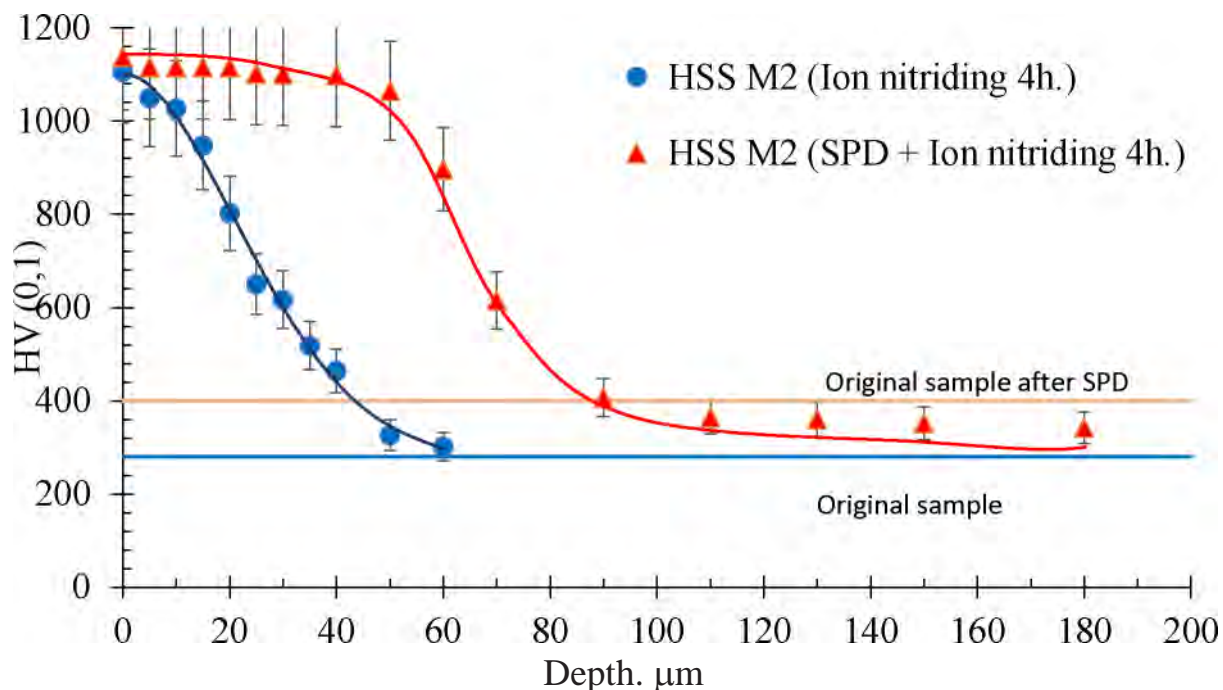


Рис. 4. Зависимость HV от глубины упрочненного слоя. Время обработки 4 часа

Fig. 4. Dependence of HV on the depth of the hardened layer. Processing time 4 hours

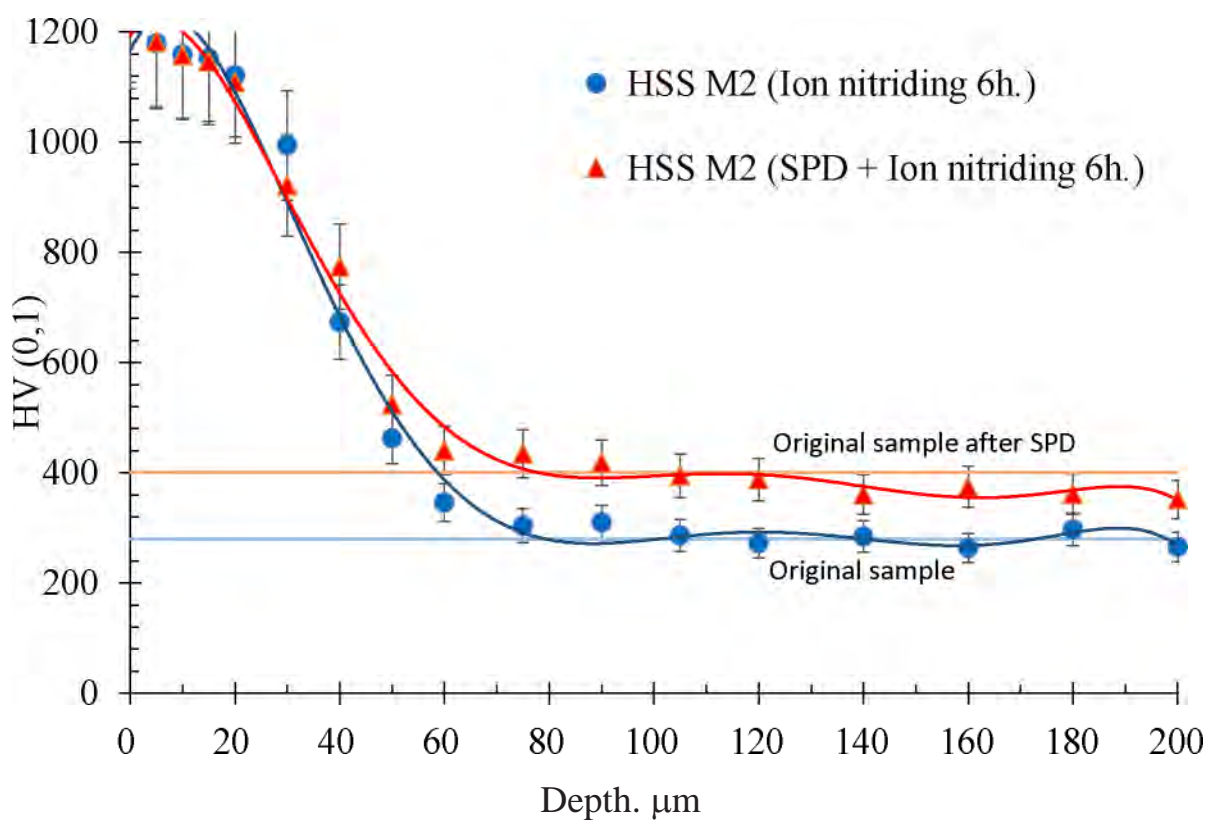


Рис. 5. Зависимость HV от глубины упрочненного слоя. Время обработки 6 часов

Fig. 5. Dependence of HV on the depth of the hardened layer. Processing time 6 hours

Для большей наглядности влияния предварительной механической обработки на значения максимальной твердости образцов был составлен график зависимости поверхностной твердости стальных образцов от времени азотирования (рис. 6, а). На данном графике видно, что эффект, оказываемый предварительной ИПД обработкой, на поверхностную твердость упрочненного слоя незначительный. Из рис. 6, б видно, что максимальный прирост твердости наблюдается при азотировании в течении 2-х часов и составил 80 HV (7,6%).

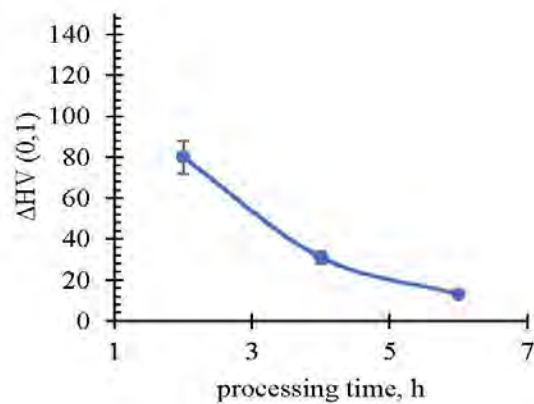
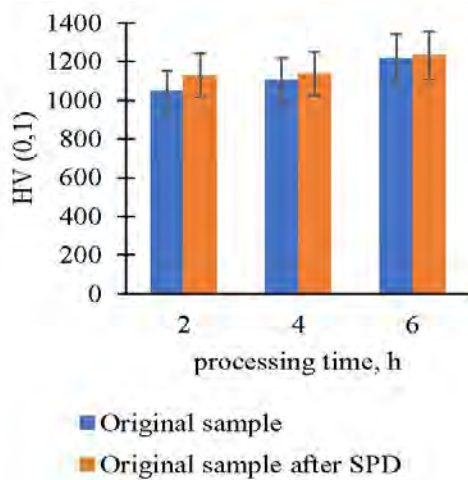


Рис. 6. График зависимости поверхностной твердости стальных образцов от времени азотирования: а – абсолютные значения HV; б – изменение максимальной величины

Fig. 6. Graph of the dependence of the surface hardness of steel samples on the nitriding time: а – absolute value of HV; б – change in the maximum value

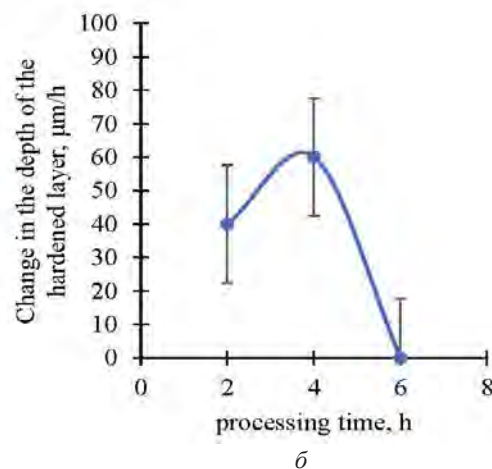
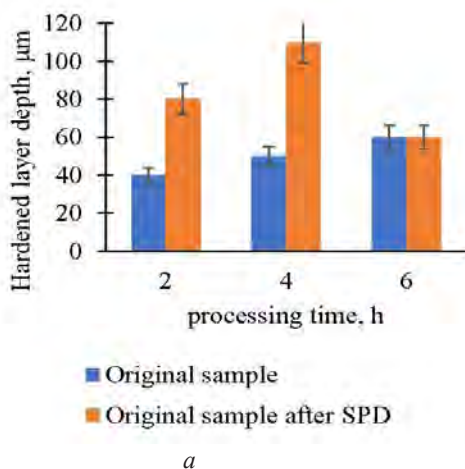


Рис. 7. Зависимость глубины упрочненного слоя от времени азотирования для образцов без и с предварительной ИПД: а – абсолютные значения упрочненного слоя; б – изменение глубины упрочненного слоя

Fig. 7. Dependence of the depth of the hardened layer on the nitriding time for samples without and with preliminary SPD: а – absolute values of the hardened layer; б – change in the depth of the hardened layer

Аналогично графику максимальной твердости (рис. 6, а) был составлен график влияния предварительной механической обработки на глубину упрочненного слоя (рис. 7, а). При анализе этого графика видно, что добавление предварительной ИПД обработки значительно увеличивает глубину упрочненного слоя для образцов, прошедших азотирование при 2-х и 4-х часах (в 2 и 2,5 раза соответственно) (рис. 7, б). Однако при 6-и часовой обработке глубина упрочненного слоя на обоих образцах одинакова. Наибольшая глубина упрочненного слоя получена при азотировании в течении 4-х часов и составляет 120 мкм.

Анализируя эти данные, были получены зависимости скорости роста упрочненного слоя определенной твердости от времени обработки. Данные для значений твердости HV 600, 800 и 1000 приведены на рис. 8.

На рис. 8 на графиках видно, что максимальное влияние на скорость протекания

процесса азотирования предварительная ИПДК обработка оказывает при азотировании в течении 4-х часов. При азотировании в течении 6-и часов влияние предварительной ИПД обработки на скорость азотирования минимально.

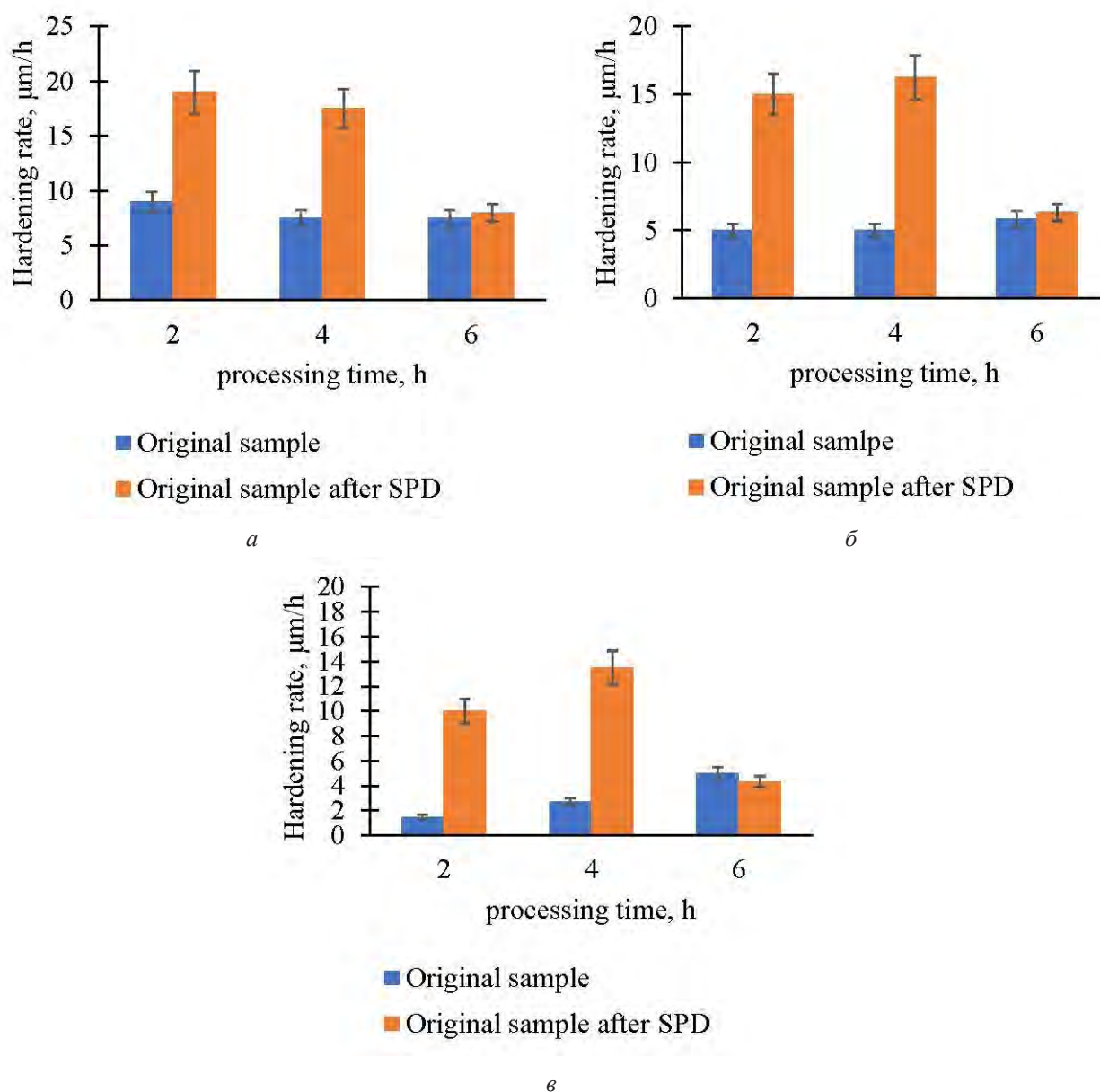


Рис. 8. Зависимость скорости роста упрочненного слоя с определенной твердостью от времени азотирования без и с предварительной ИПД:
a – 600 HV; б – 800 HV; в – 1000 HV

Fig. 8. Dependence of the growth rate of the hardened layer with a certain hardness on the nitriding time without and with preliminary SPD:
a – 600 HV; б – 800 HV; в – 1000 HV

3. Обсуждение результатов

Такие результаты объясняются тем, что на поверхности ИПДК образцов после пластической деформации кручением образовалась сильно измельченная зерненная УМЗ структура [9]. Такая структура приводит к увеличению поверхностной свободной энергии [10], что способствует увеличению адсорбции насыщающего элемента и образованию нитридов в приповерхностном слое обработанного материала, что приводит к увеличению поверхностной твердости. Также, вследствие увеличения плотности дислокаций и образования микродефектов и измельчения зерна, увеличивается скорость диффузии насыщающего элемента вглубь материала [7, 8], что способствует увеличению толщины упрочненного слоя.

Однако, при увеличении времени обработки сверх 4-х часов предварительная ИПДК обработка не оказывает никакого влияния на характеристики упрочненного слоя. Это может быть связано с тем, что за первые 4 часа азотирования на поверхности образца образуется избыточное количество γ' -фазы и ϵ -нитридов. Эти фазы препятствуют проникновению азота вглубь металла, так как скорость диффузии через γ' -фазу примерно в 25 раз, а ϵ -нитрид в 60 раз меньше, чем через феррит [11].

Также интересным результатом является то, что глубина упрочненного слоя при азотировании образцов в течении 6-и часов ниже, чем глубина упрочненного слоя, азотированного в течении 4-х часов. Таким образом, при увеличении времени обработки до 6-и часов происходит разупрочнение образца, прошедшего обработку ИПДК. Эти результаты требуют дальнейшего исследования.

Выводы

В ходе обработки полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Предварительная ИПД обработка не оказывает влияние на значение твердости поверхностного слоя. Максимальный при-

рост твердости составил 7,6% при времени обработки – 2 часа, что может быть следствием погрешности измерений.

2. Предварительная ИПД обработка оказывает значительное влияние на глубину и скорость роста упрочненного слоя при длительности азотирования от 2 до 4 часов. Максимальный прирост по глубине составил 60 мкм (120%) при азотировании в течении 4-х часов. При азотировании в течении 6 часов влияние предварительной обработки отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ultrafine-grained titanium and biomedical titanium alloys processed by severe plastic deformation (SPD) / Z. Lin et al. // SOJ Materials Science & Engineering. 2013. V. 1 (1). Article number 01. DOI: 10.15226/SOJMSE.2013.00101.
2. Surface hardening of shot peened H13 steel by enhanced nitrogen diffusion / Kyun Taek Cho et al. // Surface and Coatings Technology. 2013. V. 232. P. 912–919. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.123.
3. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening / Lie Shen et al. // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 204, Iss. 20. P. 3222–3227. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.018.
4. Lu K., Lu J. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach // Journal of Materials Science & Technology. 1999. V. 15, No. 3. P. 193–197.
5. Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment // Materials Science and Engineering: A. 2004. V. 375–377. P. 38–45. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.261.
6. Ion chemical heat treatment of alloys / B. N. Arzamasov et al. Moscow: The Bauman Moscow State Technical University, 1999. P. 134–148.
7. Bokshstein B. S. Diffusion in metals. Moscow: Metallurgy, 1978. 248 p.
8. Valiev R. Z., Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Bulk nanostructured materials. Fundamental and Applications. Hoboken: Wiley/TMS, 2014. P. 440. DOI: 10.1002/9781118742679.
9. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoj deformaciej. España: Universidad Complutense de Madrid, 2000. P. 272.
10. Enhancement of wear resistance by sand blasting-assisted rapid plasma nitriding for 304 austenitic stainless steel / D. Li et al. // Surface Engineering. 2020. V. 36, Iss. 5. P. 524–530. DOI: 10.1080/02670844.2019.1641953.

11. Berlin E. V., Koval N. N., Seidman L. A. Plasma chemical heat treatment of the steel parts surface. Moscow: Tekhnosfera, 2012. P. 10.
12. Bell T., Sun Y. Low temperature plasma nitriding and carburisation of austenitic stainless steel // *Heat Treatment of Metals*. 2002. V. 29 (3). P. 57–64.
13. Yasumaru N. Low-Temperature Ion Nitriding of Austenitic Stainless Steels // *Materials Transactions, JIM*. 1998. V. 39, Iss. 10. P. 1046–1052. DOI: 10.2320/matertrans1989.39.1046.
14. Poirier L., Corre Y., Lebrun J. Solutions to improve surface hardness of stainless steels without loss of corrosion resistance // *Surface Engineering*. 2002. V. 18, Iss. 6. P. 439–441. DOI: 10.1179/026708402225010100.
15. Influence of the magnetic field at ion nitriding in the glow-discharge on the microhardness of steel AISI 321 / R. Vafin et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1115, Iss. 3. Article number 032061. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032061.
16. Brokman A., Tuler F. A study of the mechanisms of ion nitriding by the application of a magnetic field // *J. of App. Phys.* 1981. V. 52, Iss. 1. P. 468–471. DOI: 10.1063/1.329809.
17. Automated langmuir probe measurement system for investigation of plasma parameters of low-pressure discharge / S. S. Kovalsky et al. // *Izv. VUZ. Fizika*. 2014. V. 57, No. 11-3. P. 78–82.
18. Langmuir Probe Characteristics in RF Glow Discharges / N. Hershkowitz et al. // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1988. V. 8 P. 35–52. DOI: 10.1007/BF01016929.
19. Space and time resolved Langmuir probe measurements in a 100 kHz pulsed rectangular magnetron system / J. W. Bradley et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2001. V. 142-144. P. 337–341. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01084-2.
20. Ershov A. P. Langmuir electrical probe method. Moscow: Moscow State University, 2007. P. 26.
21. Vlasov A., Larionov V., Nazimov N. Investigation of the plasma of a positive column of a glow discharge. Tomsk: TPU, 2003. P. 12.
22. Kagan Yu. M., Perel V. I. Probe methods in plasma research // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1963. V. 81, No. 3. P. 411–452. DOI: 10.3367/UFNr.0081.196311a.0409.
23. Chan P., Telbot L., Turyan K. Electric probes in stationary and moving plasma. Moscow: Mir, 1978. 203 p.
24. Sharifova E. G., Silina O. V., Makarova K. V. Analysis of published data to examine ways of intensification of the process of nitriding // *Master's journal*. 2015. No. 2. P. 60–65.