

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

М. А. СКОТНИКОВА, А. А. ПОПОВ, Г. В. ИВАНОВА, Г. В. ЦВЕТКОВА

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: skotnikova@mail.ru*

С помощью инструментального индентирования исследованы закономерности упругопластической деформации заготовок из сплавов алюминия АМц, титана ВТ23 и сталей 45, ХВГ с ГЦК, ГПУ и ОЦК-решеткой соответственно. Показано, что с увеличением глубины погружения индентора до 30 мкм, значения инструментальной твердости, модуля упругости и их отношение стремятся к значениям классической микротвердости, модуля Юнга и их отношению. Исследована природа увеличения контактных напряжений сплавов вблизи поверхности индентора. Установлена причина труднообрабатываемости сплавов на основе титана.

Ключевые слова: сплавы титана, алюминия и стали, индентирование, упругая и пластическая деформация

Введение. В процессе стружкообразования резец, действующий как макроконцентратор, формирует впереди себя волну пластической деформации и в результате приводит к разрушению обрабатываемой заготовки. Износ инструмента, как показано в работах [1—4], связан с торможением локализации пластической деформации в зоне контакта с инструментом. Материалы, при обработке которых возникает значительный (или незначительный) износ инструмента, относятся к классу трудно- или легкообрабатываемых с коэффициентом обрабатываемости $K_M = 0,1 \dots 0,3$ или $K_M = 0,9 \dots 1,0$ соответственно.

В процессе механической обработки инструмент (индентор) при движении деформирует материал заготовки, формируя волну сжатия. Поэтому измерение классической микротвердости металла [4—6] и его испытание с помощью инструментального индентирования [7—9] на нано- и микроуровне является наиболее чувствительным локальным методом оценивания свойств поверхностного слоя материала под действием сжимающих напряжений. Этот метод позволяет детально с высокой точностью произвести анализ изменения свойств материала в контактной зоне заготовки под действием движущейся пирамидки (индентора), которая, являясь концентратором, вызывает концентрацию напряжений и локализацию пластической деформации вблизи поверхности материала [10—15].

Цель настоящей статьи — изучение закономерностей изменения поверхностных свойств материалов заготовок с ГПУ, ОЦК и ГЦК-решеткой в процессе погружения индентора с помощью инструментального индентирования.

Методика и материалы. Материалом для исследования служили заготовки из сплава алюминия АМц, сталей 45, ХВГ и сплава титана ВТ23 в отожженном состоянии. Химический состав, эксплуатационные и механические свойства этих материалов представлены в табл. 1 и 2.

Механическая обработка материалов проводилась твердосплавным резцом ВК8 без смазки со скоростью подачи 0,26 мм/об и глубиной резания $t = 0,3$ мм в диапазоне скоростей резания 2...275 м/мин, линейный износ инструмента, при скорости обработки указанных сплавов 122 м/мин, — 14, 25, 31, 365 мкм.

Для индентирования поверхности материала использовали как классические микротвердомеры ПМТ 3М (Россия), FUTURE-TECH (Япония), так и прибор для инструментального индентирования CSM Micro Indentation Tester (Швейцария).

Таблица 1

Марка сплава	Химический состав, вес. %	Характер обрабатываемости	Коэффициент обрабатываемости K_m
АМц	AL - 1,5Mn - 0,7Fe - 0,6Si - 0,2Cu - 0,1Zn	Легкая	1,0
Ст45	Fe - 0,45C - 0,25Ni - 0,25Cu - 0,2Cr - 0,6Mn - 0,3Si	Средняя	0,8
ХВГ	Fe - 1C - 1,5W - 1Cr - 1Mn - 0,3Si	Средняя	0,7
BT23	Ti - 5Al - 5V - 2Mo - 1Cr - 0,5Fe	Трудная	0,25

Таблица 2

Марка сплава	Тип кристаллической решетки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	G , ГПа	E , ГПа
АМц	ГЦК	110	60	33	25	27,6	70,0
Ст45	ОЦК	610	360	10	20	78,0	145,0
ХВГ	ОЦК	725	375	25	38	77,0	164,0
BT23	ГПУ	1100	925	14	47	43,3	112,0

Результаты исследования. Оценка классической микротвердости исследованных сплавов с помощью микротвердомеров ПМТ-3М и FUTURE-TECH. Измерения микротвердости проводились при нагрузке 50 г с интервалом 50 мкм на микрошлифах как в исходном состоянии (H_{μ}), так и после механической обработки со скоростью 122 м/мин в продольной плоскости стружки (H_{μ}^*). Как показали результаты измерений микротвердости (H_{μ}) и среднего квадратического отклонения (s) (табл. 3), если в исходном состоянии сплав АМц, стали 45, ХВГ и сплав BT-23 имели микротвердость 928 ± 62 , 2050 ± 190 , 2411 ± 217 и 3903 ± 270 МПа соответственно, то после деформации (лезвийной обработки) их микротвердость повысилась до 1182 ± 66 , 3550 ± 250 , 4424 ± 440 и 4421 ± 495 МПа соответственно. Относительно исходного состояния ($(H_{\mu}^* - H_{\mu}) / H_{\mu}^*$) твердость сплавов повысилась на 21, 42, 46 и 12 % соответственно.

Таблица 3

Марка сплава	Микротвердость сплава в исходном состоянии		Микротвердость стружки в продольном направлении		Оценка способности сплава к деформационному упрочнению		
	H_{μ} , МПа	s , МПа	H_{μ}^* , МПа	s , МПа	$(H_{\mu}^* - H_{\mu}) / H_{\mu}^*$, %	H_{μ}/E	$\sigma_B - \sigma_{0,2}$, МПа
АМц	928	62	1182	66	21	0,0133	50
Ст45	2050	190	3550	250	42	0,0141	250
ХВГ	2411	217	4424	440	46	0,0147	350
BT23	3903	270	4421	495	12	0,0348	175

После лезвийной обработки сплава BT23 среднее значение микротвердости стружки изменилось мало, однако значительно возросла дисперсия измерений по сравнению с исходным состоянием. В поверхностном слое стружки в продольном направлении наблюдалось чередование значений микротвердости выше и ниже среднего [16—19].

Отношение твердости материала в исходном состоянии к его модулю упругости Юнга (H_{μ}/E) характеризует способность сплава к деформационному упрочнению. Как видно из табл. 3, отношение H_{μ}/E увеличивается в направлении от АМц → Сталь 45 → ХВГ до BT23, однако релаксационное разупрочнение в сплавах может изменить этот порядок. Известно, что о способности материала к равномерному деформационному упрочнению при растяжении можно судить и по разности пределов прочности и текучести ($\sigma_B - \sigma_{0,2}$), которая увеличивается в направлении от АМц → Сталь 45 до ХВГ (см. табл. 3). В труднообрабатываемом сплаве BT23 упрочнение невелико: вероятно, наряду с деформационным упрочнением имеет место периодическое релаксационное разупрочнение.

Оценка микротвердости исследованных сплавов с помощью инструментального индентирования прибором CSM Micro Indentation Tester. Инструментальное индентирование проводилось при непрерывном внедрении алмазной пирамиды Виккерса в образцы из исследуемых сплавов в соответствии с заданным законом увеличения нагрузки (F) от 10 до 1000 г. Индентор выдерживали в течение 30 с, а затем отводили (разгружали) до полной потери контакта с образцом. В ходе процедуры индентирования регистрировались значения нагрузки F и глубина погружения (h) индентора (рис. 1, а).

Прослеживание во времени полного цикла нагружения до заданной величины и снятия нагрузки позволило определить изменение свойств материала по глубине под действием индентора (концентратора), а именно: инструментальной твердости H_{IT} , модуля упругости E_{IT} , отношения H_{IT}/E_{IT} , глубины погружения h индентора, скорости разгрузки S из точки достижения максимальной нагрузки на кривой, релаксации (R_{IT}). При снятии приложенной нагрузки (остановке инструмента) часть работы упругой деформации исчезает, что сопровождается выделением энергии и изменением („восстановлением“) микрорельефа поверхности. Схема продольного сечения зоны индентирования приведена на рис. 1, б.

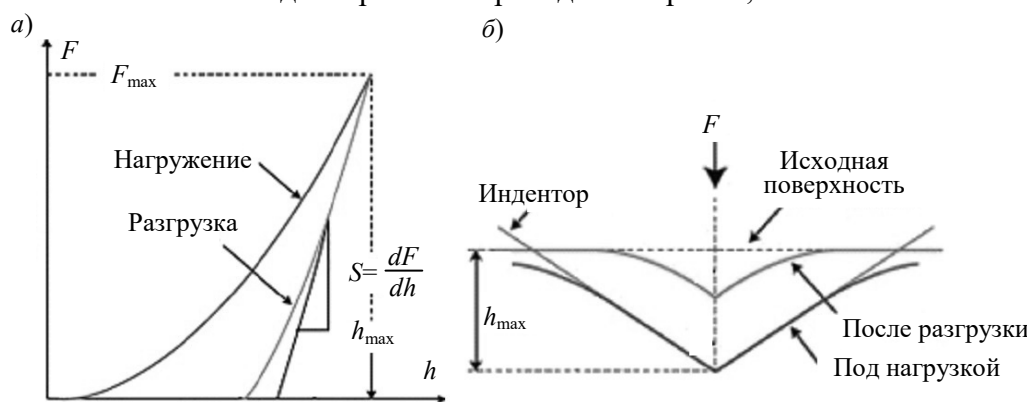


Рис. 1

На рис. 2—4 представлены полученные с помощью метода инструментального индентирования графики изменения свойств E_{IT} , H_{IT} , H_{IT}/E_{IT} , R_{IT} исследованных сплавов в зависимости от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г; для сравнения на эти же графики нанесены полученные с помощью классического метода значения модуля упругости Юнга E (согласно табл. 2), средние значения микротвердости H_{μ} (см. табл. 3), отношение H_{μ}/E . Значения инструментального модуля E_{IT} определены по наклону касательной к кривой разгрузки на F — h -диаграмме (см. рис. 1, а).

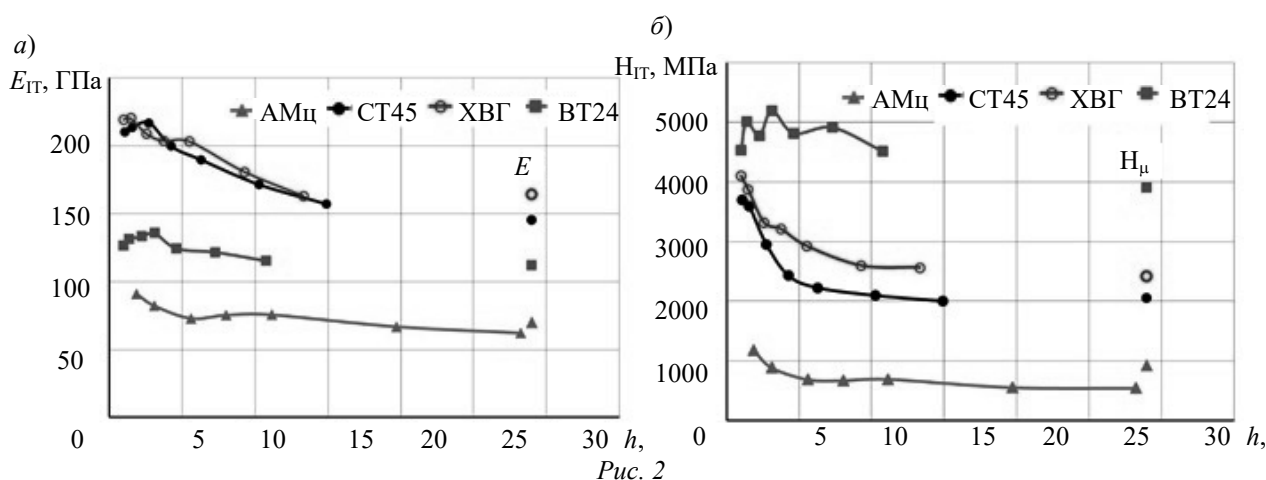


Рис. 2

Как показывает анализ представленных графиков, с увеличением h до 30 мкм значения модуля упругости E_{IT} (см. рис. 2, а) оказываются близки к значениям модуля Юнга E исследуемых сплавов.

дованных материалов (модуля продольной упругости). Инструментальная твердость H_{IT} сплавов (см. рис. 2, б) понижается, стремясь на глубине к значениям классической микротвердости H_{μ} . Наряду с этим отношение H_{IT}/E_{IT} увеличивается (рис. 3, а), стремясь на глубине к классическому отношению H_{μ}/E (см. табл. 3).

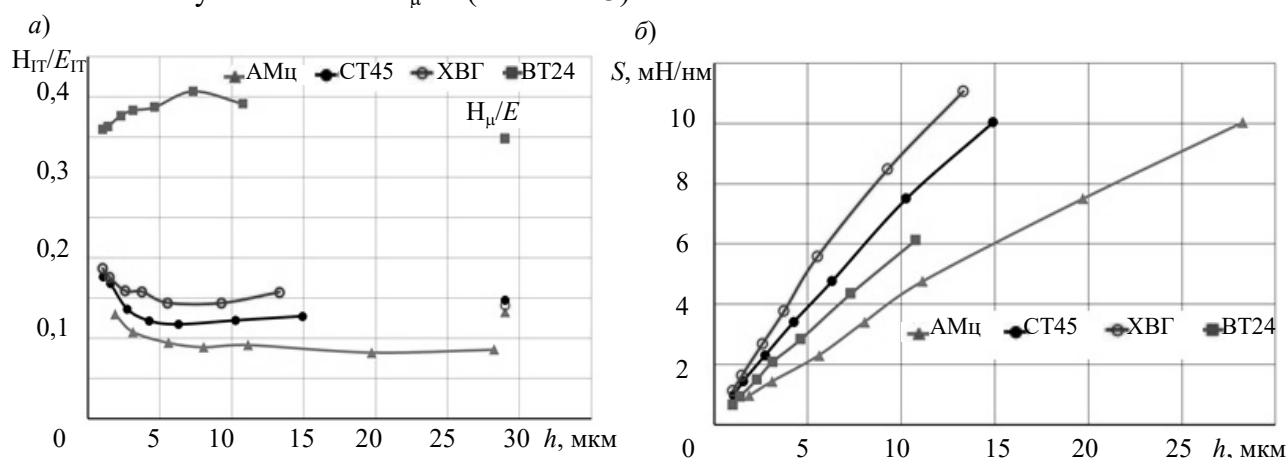


Рис. 3

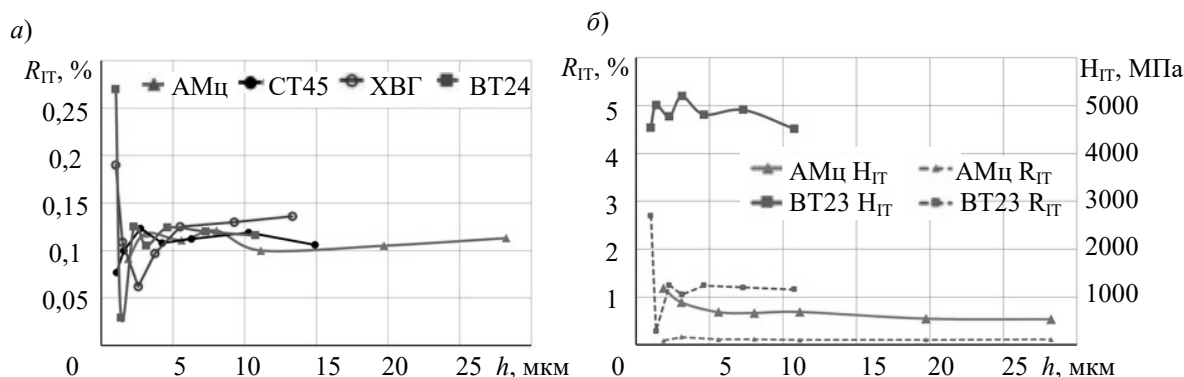


Рис. 4

Отношение H_{IT}/E_{IT} характеризует степень упруго-напряженного состояния материала заготовки, его способность к деформационному упрочнению [9]. Склонность к деформационному упрочнению сплавов, согласно рис. 3, а, возрастает от АМц → Сталь 45 → ХВГ к ВТ23; в этом же направлении затрудняется продвижение индентора в глубь поверхности.

О наличии деформационного упрочнения сплава вблизи кончика индентора можно, вероятно, судить по скорости разгрузки S из точки достижения максимальной нагрузки на диаграмме индентирования (см. рис. 1, а). На рис. 3, б представлена зависимость скорости разгрузки от глубины погружения индентора. Чем больше деформационное упрочнение, тем больше должна быть скорость разгрузки. Однако, согласно графику, склонность к деформационному упрочнению сплавов возрастает в направлении от АМц → Сталь 45 к ХВГ. В труднообрабатываемом сплаве ВТ23 скорость разгрузки невелика, что, вероятно, связано с разупрочнением.

С помощью метода инструментального индентирования были исследованы релаксационные способности всех исследованных сплавов (см. рис. 4, а). Оказалось, что труднообрабатываемый сплав ВТ23 обладает повышенной релаксационной способностью. В поверхностных слоях заготовки на глубине 1,015—2,278 μm установлена корреляция между чередованием процессов упрочнения (повышением микротвердости на 477,80—243,75 МПа) и релаксационного разупрочнения на 0,141—0,096 % с шагом 0,368—0,896 μm (рис. 4, б). Таким образом, при погружении индентора в труднообрабатываемый сплав ВТ23, наряду с деформационным упрочнением, имело место интенсивное периодическое релаксационное разупрочнение.

Заключение. Труднообрабатываемость исследованных сплавов возрастает от АМц → Сталь 45 → ХВГ до ВТ23. Продвижение индентора (инструмента) в глубь заготовки оказывается более эффективным с увеличением контактных напряжений. При этом уменьшается износ инструмента и повышается коэффициент обрабатываемости материала заготовки.

Таким образом, можно полагать, что процесс стружкообразования будет облегчен вблизи сильных концентраторов напряжений, в материалах, релаксационные процессы в которых заторможены, в условиях высоких скоростей и низких температур деформирования.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

— экспериментально установлено, что с увеличением глубины погружения индентора в исследуемые сплавы значения инструментальной твердости, модуля упругости и их отношение стремятся к значениям классической микротвердости, модуля Юнга и их отношению;

— склонность к деформационному упрочнению сплавов возрастает от АМц → Сталь 45 → ХВГ до ВТ23, однако в сплаве титана ВТ23, наряду с деформационным упрочнением, имеет место периодическое релаксационное разупрочнение; диссипативные модуляции структуры и микротвердости в сплаве ВТ23 могут быть причиной снижения напряжений в зоне контакта с индентором;

— в исследованных сплавах от АМц → Сталь 45 → ХВГ до ВТ23 возрастают износ инструмента и труднообрабатываемость заготовок с уменьшением коэффициента обрабатываемости.

Авторы выражают благодарность профессору Университета „Витовта Великого“ (Каунас, Литва) Иозасу Падгурскасу за помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Komanduri R.* New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys // *Wear*. 1981. N 69. P. 179—188.
2. *Эпштейн Ж.Н.* Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. 197 с.
3. *Flom D. G., Komanduri R., Lee M.* High-speed machining of metals // *Annual Rev. of Material Science*. 1994. P. 231—278.
4. *Иванов Е. К., Скотникова М. А., Крылов Н. А.* Структурно-фазовые превращения в труднообрабатываемых материалах как способ повышения износостойкости инструмента // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2012. № 1. С. 41—52.
5. *Скотникова М. А., Касторский Д. А., Строкينا Т. И.* Структурные превращения в металлах при скоростном резании // *Вопр. материаловедения*. 2002. № 1. С. 199—215.
6. *Скотникова М. А., Виноградов В. В., Крылов Н. А.* Учет волновой теории пластической деформации при высокоскоростной механической обработке поверхностей заготовок // *Металлообработка*. 2005. № 4(11). С. 12—17.
7. *Oliver W. C., Pharr G. M.* An improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // *J. of Materials Research*. 1992. N 7. P. 1564—1583.
8. *Mencik J.* Determination of mechanical properties by instrumented indentation // *Mechanica. ASM Intern*. 2006. N 42. P. 19—29.
9. *Khokhlova Ju., Khokhlov M., Tunik A., Ishchenko A.* Nanoindentation of micro weld formed through thin nanolayered filler // *Nanomechanical Analysis of High Performance Materials: Book Ser.; Ed. Atul Tiwari*. Springer. 2014. P. 251—262.
10. *Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И.* и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.
11. *Лихачев В. А., Панин В. Е., Засимчук Е. Е.* и др. Кооперативные процессы и локализация деформации. Киев: Наукова думка, 1989. 320 с.
12. *Финкель В. М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 322 с.

13. Качанов Л. М. Фундаментальная механика разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
14. Skotnikova M. A., Ivanova G. V., Popov A. A. Localization of plastic deformation HCP-crystals during indentation and scratching // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018. N 26. P. 143—150.
15. Скотникова М. А., Стрельникова А. А., Иванова Г. В. и др. Локализация пластической деформации в аустенитной стали при низкотемпературном циклирующем нагружении // Современное машиностроение: Наука и образование. СПб: Политех-Пресс, 2019. С. 444—464.
16. Skotnikova M. A., Krylov N. A., Tsvetkova G. V., Ivanov E. K. Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. N 25. P. 159—168.
17. Skotnikova M. A., Krylov N. A. About the nature of dissipative processes in cutting treatments of titanium vanes // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. N 26. P. 115—123.
18. Krylov N. A., Skotnikova M. A., Popov A. A. Tool wear at high-speed cutting // Proc of the 17th Intern. Symp. "Doctoral School of Energy and Geotechnology III"; School of Engineering, Tallinn University of Technology, Kuressaare, Estonia, 15—20 Jan. 2018. P. 34—37.
19. Skotnikova M. A., Krylov N. A., Popov A. A. Structural and phase transformation in metals at high speed cutting and wear of tool // Procedia Engineering. 2017. P. 777—782.

Сведения об авторах

- Маргарита Александровна Скотникова** — д-р техн. наук, профессор; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; E-mail: skotnikova@mail.ru
- Александр Александрович Попов** — аспирант; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; E-mail: alexandr-popov92@mail.ru
- Галина Валерьевна Иванова** — аспирант; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; ст. преподаватель; E-mail: galura@yandex.ru
- Галина Викторовна Цветкова** — канд. техн. наук, доцент; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; E-mail: tsvetkova_gv@mail.ru

Поступила в редакцию
25.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Скотникова М. А., Попов А. А., Иванова Г. В., Цветкова Г. В. Исследование свойств поверхности сплавов с помощью инструментального индентирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 460—466.

INVESTIGATION OF SURFACE PROPERTIES OF ALLOYS USING INDENTATION INSTRUMENTS

M. A. Skotnikova, A. A. Popov, G. V. Ivanova, G. V. Tsvetkova

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: skotnikova@mail.ru*

Using indentation instruments, the features of elastoplastic deformation of samples made of alloys are investigated. The alloys of aluminum AMc, titanium VT23, and steels 45, HVG with FCC, HCP and BCC lattices, respectively, are studied. It is shown that when indentation depth increases, instrumental hardness (H1T), elastic modulus (E1T), and their ratios (H1T / E1T) tend to the values of classical microhardness H μ , Young's modulus E, and their ratio (H μ /E). The nature of localization of plastic deformation of alloys near the surface of the indenter is analyzed. The reason for the hard workability of titanium-based alloys is determined.

Keywords: alloys of titanium, aluminum, and steel, indentation, elastic and plastic deformation

REFERENCES

1. Komanduri R. *Wear*, 1981, vol. 69, pp. 179—188.
2. Epshteyn Zh.N. *Vysokoskorostnaya deformatsiya i struktura metallov* (High-Speed Deformation and Metal Structure), Moscow, 1971, 197 p. (in Russ.)

3. Flom D.G., Komanduri R., Lee M. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1994, pp. 231–278.
4. Ivanov E.K., Skotnikova M.A., Krylov N.A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*, 2012, no. 1, pp. 41–52. (in Russ.)
5. Skotnikova M.A., Kastorskiy D.A., Strokina T.I. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2002, no. 1, pp. 199–215. (in Russ.)
6. Skotnikova M.A., Vinogradov V.V., Krylov N.A. *Metalloobrabotka*, 2005, no. 4(11), pp. 12–17. (in Russ.)
7. Oliver W.C., Pharr G.M. *J. Mater. Res.*, 1992, vol. 7, pp. 1564–1583.
8. Mencík J. *Mechanica. ASM International*, 2006, vol. 42, pp. 19–29.
9. Khokhlova J., Khokhlov M., Tunik A. et al. *Nanoindentation of Micro Weld Formed through Thin Nanolayered Filler*, Springer book, 2014, vol. 203, pp. 251–262.
10. Panin V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I. et al. *Strukturnyye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* (Structural Levels of Plastic Deformation and Fracture), Novosibirsk, 1990, 255 p. (in Russ.)
11. Likhachev V.A., Panin V.E., Zasimchuk E.E. et al. *Kooperativnyye protsessy i lokalizatsiya deformatsii* (Cooperative Processes and Localization of Deformation), Kiyev, 1989, 320 p. (in Russ.)
12. Finkel' V.M. *Fizika razrusheniya* (Physics of Destruction), Moscow, 1970, 322 p. (in Russ.)
13. Kachanov L.M. *Fundamental'naya mekhanika razrusheniya* (Fundamental Fracture Mechanics), Moscow, 1974, 311 p. (in Russ.)
14. Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Popov A.A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 26, pp. 143–150.
15. Skotnikova M.A., Strel'nikova A.A., Ivanova G.V. et al. *Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye* (Modern Engineering: Science and Education), St. Petersburg, 2019, pp. 444–464. (in Russ.)
16. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Tsvetkova G.V. et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 25, pp. 159–168.
17. Skotnikova M.A., Krylov N.A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 26, pp. 115–123.
18. Krylov N.A., Skotnikova M.A., Popov A.A. *17th Int. Symposium "Doctoral School of Energy and Geotechnology III"*, School of Engineering, Tallinn University of Technology, 15–20.01.2018, Kuressaare, Estonia, 2018, pp. 34–37.
19. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Popov A.A. *Procedia Engineering*, 2017, pp. 777–782.

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Margarita A. Skotnikova | — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials and Transport; E-mail: skotnikova@mail.ru |
| Alexander A. Popov | — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials and Transport; E-mail: alexandr-popov92@mail.ru |
| Galina V. Ivanova | — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials and Transport; Senior Lecturer; E-mail: galura@yandex.ru |
| Galina V. Tsvetkova | — PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials and Transport; E-mail: tsvetkova_gv@mail.ru |

For citation: Skotnikova M. A., Popov A. A., Ivanova G. V., Tsvetkova G. V. Investigation of surface properties of alloys using indentation instruments. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 460–466 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-460-466