

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЁНКИ

PACS numbers: 46.55.+d, 46.80.+j, 62.20.Qp, 68.35.Gy, 81.40.Pq, 81.65.Ps

Тонкая структура поверхностного слоя и трибологические свойства деталей из улучшенной стали 40X после чистовой токарной обработки резцами с покрытиями

М. Енек, Е. Фельдштейн

*Зеленогурский университет,
ул. проф. З. Шафрана, 4,
65-516 Зелена Гура, Польша*

Представлены результаты исследования изменений тонкой структуры поверхностного слоя и трибологических свойств деталей из улучшенной стали 40X после чистового точения в зависимости от состава и толщины покрытия PVD на сменных твёрдосплавных пластинах. Установлены взаимосвязи между параметрами тонкой структуры, остаточными напряжениями поверхностного слоя, коэффициентами трения и интенсивностью изнашивания обработанной поверхности.

Наведено результати дослідження змін тонкої структури поверхневого шару і трибологічних властивостей деталей із поліпшеної сталі 40X після чистового точіння залежно від складу і товщини покриття PVD на змінних твердостопних платівках. Встановлено взаємозв'язки між параметрами тонкої структури, залишковими напруженнями поверхневого шару, коефіцієнтами тертя та інтенсивністю зношування обробленої поверхні.

The results of studies of changes in the fine structure of the surface layer and tribological properties of parts made of the QT steel 41Cr4 after finish-turning operation depending on composition and thickness of the PVD coating on changeable carbide blades are described. Correlations between the parameters of fine structure, the residual stresses of a surface layer, the coefficients of friction, and the wear rate of the machined surface are determined.

Ключевые слова: тонкая структура, сталь 40X, чистовое точение, покрытия PVD.

(Получено 21 января 2014 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития финишной обработки является то-

чение деталей машин в закалённом состоянии вместо шлифования [1–4]. При использовании таких технологий следует учитывать, что придание определённой формы деталям машин вызывает одновременное изменение свойств их поверхностного слоя. Поскольку процессы механической обработки сопровождаются сложными физическими явлениями, возникающими в зоне обработки и обусловленными высокими температурами и силами резания, трением контактирующих поверхностей и др.

Процессы разрушения деталей машин начинаются в их поверхностном слое [5], причём существенное влияние на эти процессы оказывает состояние контактирующих поверхностей, в том числе остаточные напряжения, наклёп и шероховатость поверхности. Поэтому необходимо обеспечить такие условия формирования поверхностного слоя, которые обеспечивают его наибольшую работоспособность.

В случаях взаимного скольжения деталей, если рассматривать реальную структуру материала как собрание идеальных объёмов металла и дефектов макро- и микроструктуры, включающих микротрещины, поры, текстуры, инородные включения и т.п. [6], роль поверхностного слоя становится ещё более важной.

Ниже представлены результаты исследований параметров тонкой структуры и трибологических характеристик деталей, изготовленных из улучшенной стали 40X в различных условиях обработки.

2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях использовали сменные неперетачиваемые пластины SPUN 120312 из твёрдого сплава P25 ISO 513:2012 [7], примерно соответствующего твёрдому сплаву ТТ20К9 ГОСТ 3882–74, на которые методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) наносили покрытия (TiCr)N и (NbTiZr)N толщиной 2 и 4 мкм, а также покрытия (TiAl)N и (AlTi)N толщиной 4 мкм. Состав покрытий приведён в табл. 1. Все этапы вакуумно-плазменной обработки инструмента по методу КИБ выполнялись при использовании многофункциональной установки «СТАНКИН-АПП-1», оснащённой устройством для

ТАБЛИЦА 1. Химический состав покрытий, %.

Состав	Ti	Nb	Cr	Zr	Al
(TiCr)N	80	–	20	–	–
(NbTiZr)N	10	20	–	70	–
(TiAl)N	50	–	–	–	50
(AlTi)N	33	–	–	–	66

генерации плазмы двухступенчатого вакуумно-дугового разряда, вакуумно-дуговыми испарителями, многоканальной системой впуска газов, системой бесконтактного контроля над температурой обрабатываемого инструмента, а также комплексом вспомогательного оборудования для измерения и контроля параметров процесса обработки.

Толщина покрытия обеспечивалась выбором длительности экспозиции при нанесении покрытий и выборочно контролировалась с помощью прецизионного ультразвукового толщиномера OLIMPUS 38DL PLUS.

Обрабатывали образцы из стали 40X ГОСТ 4543-71 (аналог 41Cr4 EN) после термообработки (улучшение) до твердости 42 HRC. Точение выполняли резцами с оправкой CSDPR 2020K12 при скорости резания 150 м/мин, глубине резания 0,25 мм и подаче 0,08 мм/об. Для сравнения рассматривались также образцы, обработанные круглым наружным шлифованием.

Исследования фазового состава и тонкой структуры поверхностного слоя выполнялись при использовании рентгеновского дифрактометра общего назначения ДРОН-3.0 в монохроматизированном CuK_α -излучении. Вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом при вращении образца в собственной плоскости. Для определения фазового состава выполнялась съёмка полной рентгенограммы в непрерывном режиме с шагом по углу $0,1^\circ$. Интервал углов $2\theta = 40^\circ - 105^\circ$ выбирался с учётом нахождения линий предполагаемых α - и γ -фаз, включающих все линии карточки (31-0619) γ -Fe austenite и карточки (06-0696) α -Fe ferrite карточки ASTM (электронная версия PCPDFWIN 2.0). Интервал углов 2θ каждой линии определялся по её положению из полного (при съёмке на фазовый анализ) рентгеновского спектра и принимался как минимум $\pm 4^\circ$ в обе стороны от центра линии с целью получения её полного профиля, который по концам выходит на уровень фона. Сбор и обработка информации осуществлялись с помощью программы WinDif. Последовательность расчётов описана в [8].

Определялись следующие параметры тонкой структуры: размеры областей когерентного рассеивания (блоков мозаики) согласно зависимости Селякова–Шеррера:

$$D_{HKL} = 0,941\lambda / (\beta \cos \theta),$$

где λ — длина волны рентгеновского излучения, β — физическое расширение, θ — угол отражения рентгеновского излучения; среднеквадратические микродеформации (напряжения 2-го рода, микронапряжения) согласно зависимости Селякова–Шеррера:

$$\Delta d / d = (\beta / 2)\sqrt{2\pi}\text{tg}\theta,$$

плотность дислокаций:

$$\rho = k\beta^2 / (F|\mathbf{b}|^2),$$

где k — коэффициент, зависящий от модулей упругости и сдвига, формы линий и других факторов, β — физическое расширение 1-ой линии рентгенограммы, F — множитель, зависящий от изменения упругой энергии единичной дислокации при взаимодействии с полем напряжений в кристалле, \mathbf{b} — вектор Бюргерса.

Дополнительно определялись напряжения 1-го рода (макронапряжения), действующие в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, согласно известной зависимости:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -(E/\mu)\text{ctg}\theta_s(\theta_s - \theta),$$

где E и μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала, θ_s и θ — углы отражения рентгеновских лучей соответственно от эталона и исследуемого образца соответственно.

Исследования трибологических свойств поверхностей были выполнены на машине трения Т-05, действующей по схеме «ролик-колодка» в условиях концентрированного стыка. Ролики выполнялись из исследуемой стали, колодки — из бронзы CuSi3Zn3Mn (аналог бронзы Бр КЦМц 3-3-1). Шероховатость трущихся поверхностей в исходном состоянии: для роликов $R_a = 0,47 \pm 0,03$ мкм, для колодок $R_a = 0,35 \pm 0,005$ мкм. Испытания выполнялись при скорости скольжения 0,33 м/с и силе нагружения 900 Н. Время испытаний — 1 ч. В качестве смазочного материала использовалось машинное масло AN-68 (аналог ИНЕ-68 [9]), условия смазывания — погружение в масляной ванне. Регистрирующая система машины трения содержит комплект датчиков, позволяющих измерение во времени силы трения, температур колодки и масляной ванны, а также суммы износов трущихся поверхностей ролика и колодки. На основании изменений силы трения рассчитывали коэффициент трения μ .

Определялся также объёмный износ [мм³] по формуле:

$$Z_v = (D_t^2 l / 8) [2 \arcsin(b / D_t) - \sin(2 \arcsin(b / D_t))],$$

где D_t — диаметр ролика, l — ширина колодки, b — средняя ширина следа износа.

Износостойкость оценивалась по формуле:

$$I_z = Z_v / L,$$

где L — путь трения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании изменений интенсивности отдельных рентгеновских линий определены параметры тонкой структуры в поверхностных слоях образцов. Графическая интерпретация результатов приведена на рис. 1–4. Легко заметить, что особенности покрытия, нанесённого на инструмент, оказывают существенное влияние на пара-

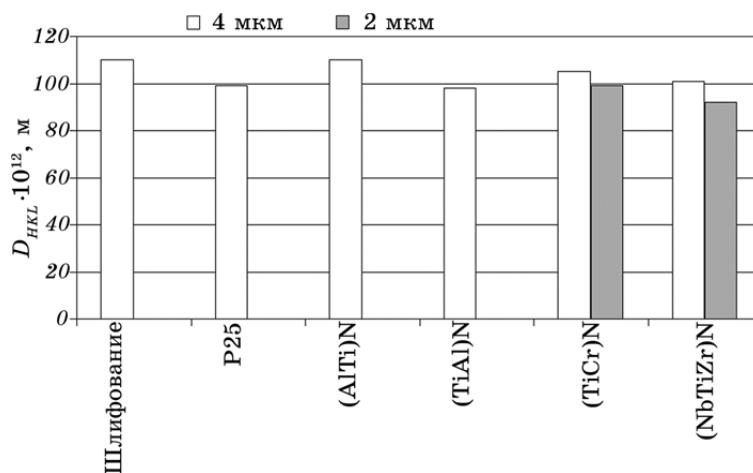


Рис. 1. Изменения размеров областей когерентного рассеивания в зависимости от свойств покрытия.

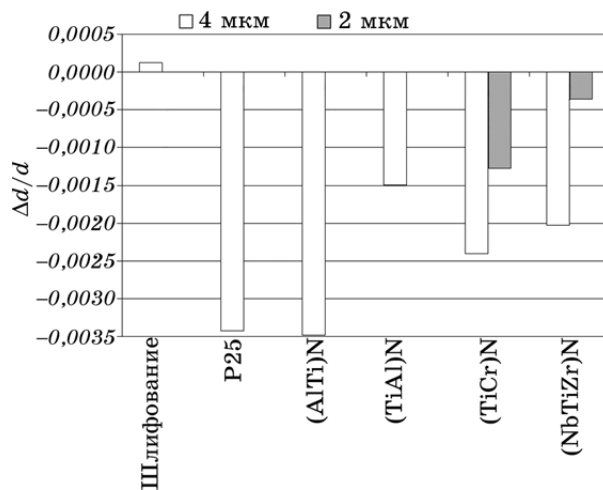


Рис. 2. Изменения степени деформации шага кристаллической решётки в зависимости от свойств покрытия.

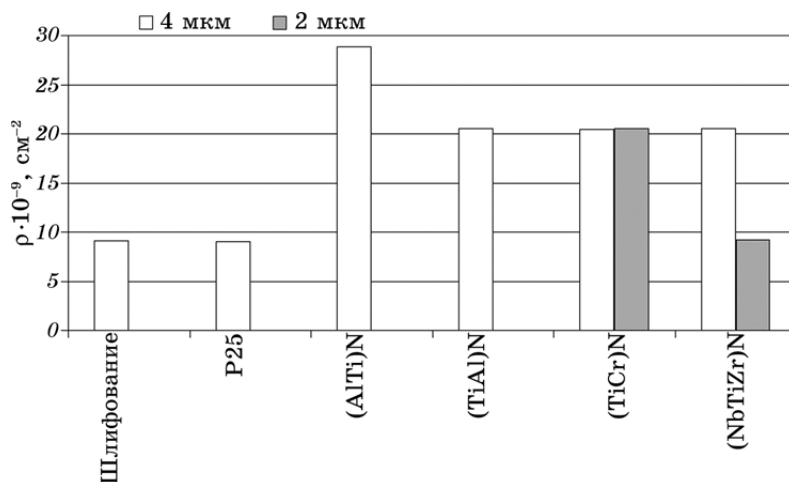


Рис. 3. Изменения плотности дислокаций в зависимости от свойств покрытия.

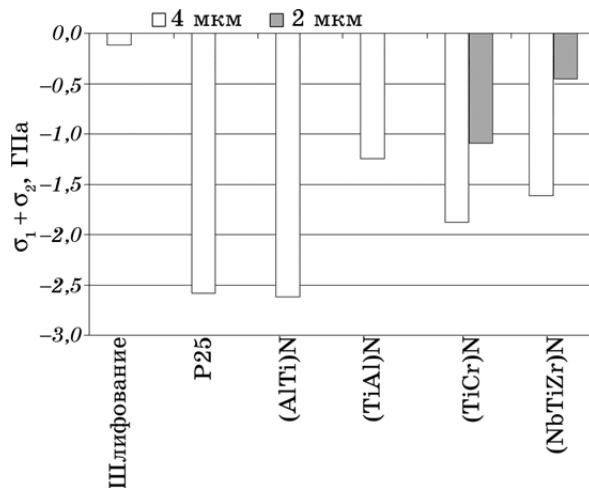


Рис. 4. Значения напряжений 1-го рода в зависимости от свойств покрытия.

метры тонкой структуры.

В работе [8] на основании анализа результатов исследований [10–18] рассмотрены взаимосвязи между параметрами тонкой структуры для случая финишного точения легированных чугунов. Отмечена однозначная зависимость между микродеформациями и плотностью дислокаций в поверхностном слое для всех исследованных сочетаний обработки. Базируясь на анализе взаимосвязей между па-

раметрами тонкой структуры, сделан вывод, что значительные микродеформации однозначно способствуют концентрации дислокаций в областях когерентного рассеивания, препятствуя их движению и выходу на границы межзёрненного раздела. В условиях формирования тонкой структуры в поверхностном слое чугунных деталей не подтвердилось мнение о превалирующем влиянии размеров областей когерентного рассеивания на упрочнение материала и вспомогательной роли микродеформаций, а одновременно тесной взаимосвязи между ними. В исследованиях [8] такой эффект наблюдался только в одном случае, как исключение. Одновременно статистически корректным оказалось утверждение, что напряжения 1-го рода, действующие в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, влияют на параметры тонкой структуры поверхностного слоя чугунных деталей. Интенсивность и направление этого влияния зависит от сочетания составляющих микроструктуры чугунов, формы и размеров частиц графита, теплотехнических характеристик инструментального материала.

При анализе изменений тонкой структуры обработанной поверхности улучшенной стали 40Х зафиксированы весьма высокие коэффициенты корреляции между её параметрами (табл. 2). Очевидно, что такие тесные взаимосвязи обусловлены более стабильными структурными и механическими свойствами стали по сравнению с чугуном.

Параметры тонкой структуры поверхностного слоя, сформированного при шлифовании, отличаются от параметров, свойственных лезвийной обработке: наибольшие размеры областей когерентного рассеивания, незначительная плотность дислокаций, наименьшие значения напряжений 2-го рода и положительные значения напряжений 1-го рода.

Изменения свойств покрытий на режущем инструменте воздействуют на трибологические характеристики обработанных поверхностей, в частности, на коэффициенты трения и интенсивность изнашивания.

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты корреляции между параметрами тонкой структуры и внутренними напряжениями в поверхностном слое (толщина покрытия 4 мкм).

$D_{HKL}-\Delta d/d$	$D_{HKL}-\rho$	$D_{HKL}-(\sigma_1 + \sigma_2)$	$\Delta d/d-\rho$	$\Delta d/d-(\sigma_1 + \sigma_2)$	$\rho-(\sigma_1 + \sigma_2)$
-0,528	0,826	-0,988	-0,889	0,999	-0,888

Наименьшее значение коэффициента трения (рис. 5) зафиксировано для образцов, обработанных инструментом с покрытием (AlTi)N толщиной 4 мкм ($\mu \cong 0,08$). Для прочих сочетаний «состав покрытия–толщина покрытия» коэффициент трения несколько выше ($\mu = 0,10–0,12$). Для всех образцов, обработанных инструментом с покрытием, зафиксировано снижение коэффициента трения на 5–40% по сравнению с образцами, обработанными инструментом без покрытия. По сравнению со шлифованными образцами снижение коэффициента трения наступило для покрытия (AlTi)N, для остальных покрытий эффект был практически несущественным.

Применение инструментов с покрытиями при чистовой токарной обработке способствовало сокращению интенсивности изнашивания обработанных поверхностей (рис. 6), причём для покрытий толщиной 4 мкм интенсивность ниже, чем для покрытий толщиной 2 мкм. Для всех покрытий толщиной 4 мкм наблюдается значительное снижение интенсивности изнашивания, наиболее эффективны покрытия (AlTi)N ($\cong 45\%$) и (TiCr)N ($\cong 35\%$). Различия в интенсивности изнашивания обработанных поверхностей достигают 20%, что свидетельствует о необходимости соответствующего выбора состава покрытия при обработке определённого материала.

По результатам исследований были определены коэффициенты корреляции между параметрами упрочнения поверхностного слоя деталей из стали 40X и его трибологическими характеристиками (табл. 3).

Легко заметить, что тесные связи существуют между плотностями дислокаций ρ , размерами областей когерентного рассеяния D_{HKL}

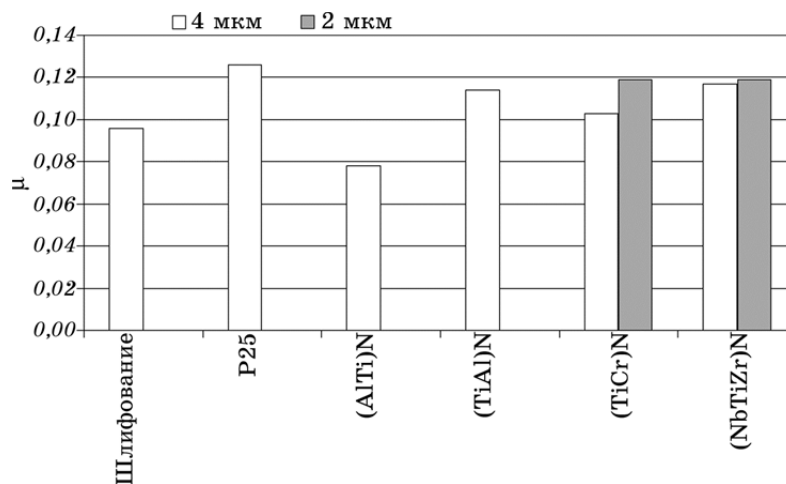


Рис. 5. Средние значения коэффициента трения в зависимости от свойств покрытия.

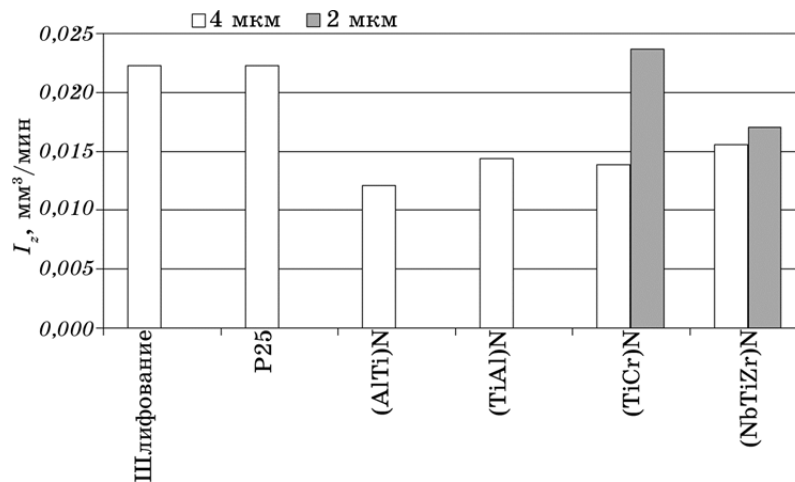


Рис. 6. Влияние свойств покрытия на интенсивность изнашивания обработанной поверхности.

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты корреляции между параметрами упрочнения и трибологическими характеристиками поверхностного слоя.

Параметр	Интенсивность изнашивания I_z	Коэффициент трения μ
	Толщина покрытия 4 μm	
D_{HKL}	-0,6231	-0,9355
ρ	-0,9532	-0,8771
$\Delta d/d$	-0,3092	0,3476
$\sigma_1 + \sigma_2$	-0,3091	0,3475
	Толщина покрытия 2 μm	
D_{HKL}	-0,4130	-0,8529
ρ	-0,5234	-0,8268
$\Delta d/d$	0,1121	0,4531
$\sigma_1 + \sigma_2$	0,1118	0,4529

и трибологическими свойствами поверхностного слоя обработанных образцов.

Выполненный статистический анализ позволил найти зависимости между указанными величинами и коэффициенты детерминации R^2 для этих зависимостей:

$$I_z = 9 \cdot 10^6 \rho^{-1,835} [\text{мм}^3/\text{мин}], R^2 = 0,964,$$

$$\mu = 10^{-22} \rho^2 + 3 \cdot 10^{-12} \rho + 1123, R^2 = 0,916,$$

$$\mu = -0,003D_{HKL}^2 + 0,0582D_{HKL} - 2,7349, R^2 = 0,940.$$

где ρ — плотность дислокаций, D_{HKL} — средний размер областей когерентного рассеяния.

4. ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований установлено влияние состава покрытия на параметры тонкой структуры и трибологические свойства поверхностного слоя образцов из стали 40X. Между параметрами тонкой структуры существуют весьма тесные корреляционные связи, обусловленные однородной структурой стали. Уменьшение толщины покрытия с 4 до 2 мкм не влияет на размеры областей когерентного рассеивания, но может значительно изменить напряжения 1-го и 2-го рода и плотность дислокаций. Трибологические характеристики зависят в первую очередь от плотности дислокаций и средних размеров областей когерентного рассеяния. Среди исследованных покрытий наиболее эффективно (AlTi)N толщиной 4 мкм. Уменьшение толщины покрытия до 2 мкм не оказывает существенного влияния на коэффициент трения, но может вызвать существенное, более 70%, возрастание интенсивности изнашивания обработанной поверхности.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Bartarya and S. K. Choudhury, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **53**, No. 1: 1 (2012).
2. G. Byrne, D. Dornfeld, and B. Denkena, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **52**, No. 2: 483 (2003).
3. M. M. W. Knuefermann and P. A. McKeown, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **53**, No. 1: 99 (2004).
4. Y. Matsumoto, F. Hashimoto, and G. Lahoti, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **48**, No. 1: 59 (1999).
5. T. Burakowski, T. Wierzchoń, *Inżynieria Powierzchni Metali: Podstawy, Urządzenia, Technologie (Engineering of a Surface of Metals: Principles, Devices, Technologies)* (Warszaw: WNT: 1995) (in Polish).
6. G. Starzyński, *Proc. of VIII Training Sem. 'Nondestructive Investigations of Materials'* (Zakopane: 2002), p. 32.
7. M. Wysiecki, *Nowoczesne Materiały Narzędziowe (Advanced Tool Materials)* (Warszaw: WNT: 1997) (in Polish).
8. Е. Фельдштейн, Г. Паха-Голенбиовска, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 11: 1543 (2011).
9. М. Хебда, А. В. Чичинадзе, *Справочник по триботехнике. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения* (Москва: Машиностроение: 1990).
10. Л. С. Мороз, *Журнал технической физики*, **24**, № 4: 705 (1954).

11. Я. С. Уманский, Л. Х. Пивоваров, *Заводская лаборатория*, **24**, № 5: 549 (1958).
12. Л. С. Мороз, *Тонкая структура и прочность стали* (Москва: Metallurgizdat: 1957).
13. Г. В. Курдюмов, М. Д. Перкас, Л. Г. Хандрос, *Физ. мет. металловед.*, **7**, № 5: 747 (1959).
14. В. М. Голубков, *Физ. мет. металловед.*, **5**, № 3: 465 (1957).
15. Л. И. Миркин, Я. С. Уманский, *Научные доклады высшей школы*, **1**: 179 (1959).
16. L. A. Dobrzański, *Metalowe Materiały Inżynierskie (Metallic Materials of Engineering)* (Warszaw: WNT: 2004) (in Polish).
17. Д. М. Васильев, Б. И. Смирнов, *Успехи физических наук*, **73**, № 3: 503 (1961).
18. В. К. Старков, *Дислокационные представления о резании металлов* (Москва: Машиностроение: 1979).

REFERENCES

1. G. Bartarya and S. K. Choudhury, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **53**, No. 1: 1 (2012).
2. G. Byrne, D. Dornfeld, and B. Denkena, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **52**, No. 2: 483 (2003).
3. M. M. W. Knuefermann and P. A. McKeown, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **53**, No. 1: 99 (2004).
4. Y. Matsumoto, F. Hashimoto, and G. Lahoti, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **48**, No. 1: 59 (1999).
5. T. Burakowski, T. Wierzchoń, *Inżynieria Powierzchni Metali: Podstawy, Urządzenia, Technologie (Engineering of a Surface of Metals: Principles, Devices, Technologies)* (Warszaw: WNT: 1995) (in Polish).
6. G. Starzyński, *Proc. of VIII Training Sem. 'Nondestructive Investigations of Materials'* (Zakopane: 2002), p. 32.
7. M. Wysiecki, *Nowoczesne Materiały Narzędziowe (Advanced Tool Materials)* (Warszaw: WNT: 1997) (in Polish).
8. E. Feldshtein and H. Pacha-Gołębiowska, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 11: 1543 (2011) (in Russian).
9. M. Khebda and A. V. Chichinadze, *Spravochnik po Tribotekhnike. T. 2. Smazochnye Materialy, Tekhnika Smazki, Opory Skol'zheniya i Kacheniya (Tribological Engineering Handbook. Vol. 2. Lubricants, Lubrication Technique, Sliding and Rolling Bearings)* (Moscow: Mashinostroenie: 1990) (in Russian).
10. L. S. Moroz, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **24**, No. 4: 705 (1954) (in Russian).
11. Ya. S. Umanskiy and L. Kh. Pivovarov, *Zavodskaya Laboratoriya*, **24**, No. 5: 549 (1958) (in Russian).
12. L. S. Moroz, *Tonkaya Struktura i Prochnost' Stali (Fine Structure and Strength of Steel)* (Moscow: Metallurgizdat: 1957) (in Russian).
13. G. V. Kurdyumov, M. D. Perkas, and L. G. Khandros, *Fiz. Met. Metalloved.*, **7**, No. 5: 747 (1959) (in Russian).
14. V. M. Golubkov, *Fiz. Met. Metalloved.*, **5**, No. 3: 465 (1957) (in Russian).
15. L. I. Mirkin and Ya. S. Umanskiy, *Nauchnye Doklady Vysshey Shkoly (Science Reports of High School)*, **1**: 179 (1959) (in Russian).

16. L. A. Dobrzański, *Metalowe Materialy Inżynierskie (Metallic Materials of Engineering)* (Warszaw: WNT: 2004) (in Polish).
17. D. M. Vasil'ev and B. I. Smirnov, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **73**, No. 3: 503 (1961) (in Russian).
18. V. K. Starkov, *Dislokatsionnye Predstavleniya o Rezanii Metallov (Dislocation Ideas about Metal Cutting)* (Moscow: Mashinostroenie: 1979) (in Russian).