

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряжённого состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании

А.П. Крень¹, М.Н. Делендик², О.В. Мацулевич¹, О.К. Гусев², К.В. Пантелеев², Р.И. Воробей²

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 04.05.2023

Принята к печати 07.06.2023

Изучение поля напряжений в пластическом отпечатке и вокруг него имеет большое прикладное значение. Процессы, подобные вдавлению индентора, используются при дробеструйной обработке для упрочнения поверхности материалов и генерации сжимающих напряжений в поверхностных слоях. Целью работы являлось изучение изменения напряжённо-деформированного состояния в области пластического отпечатка при увеличении нагрузки, при переходе от малых деформаций к большим, а также изменения напряжения при различных скоростях деформации.

Методом дифракции рентгеновских лучей изучено поле остаточных напряжений, сгенерированных на поверхности пластически деформированной области – в зоне отпечатка, образующегося при вдавлении в металл сферического индентора. Проанализировано изменение распределения напряжений при увеличении нагрузки в диапазоне глубин пластического отпечатка 10–60 мкм для сталей и алюминия. Изучено влияние скорости нагружения, при нормальном контакте соударяющихся тел, на изменение значений остаточных напряжений. Показано, что распределение напряжений имеет сложный характер с областями сжатия и растяжения металла и определяется соотношением глубины отпечатка к его диаметру.

Полученные экспериментальные данные позволяют определять выбор оптимальных режимов дробеструйной обработки, в том числе для повышения предела выносливости изделий.

Ключевые слова: деформация, распределение механических напряжений, статическое и динамическое индентирование, дифракция рентгеновских лучей, поверхность

Адрес для переписки:

Крень А.П.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь
e-mail: 762-33-00@gmail.com

Address for correspondence:

Kren A.P.
Institute of Applied Physics of the National Academy
of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus
e-mail: 762-33-00@gmail.com

Для цитирования:

А.П. Крень, М.Н. Делендик, О.В. Мацулевич, О.К. Гусев,
К.В. Пантелеев, Р.И. Воробей.
Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения
напряжённого состояния поверхности металла при статическом
и ударном деформировании.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 115–125.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

For citation:

A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev,
K.U. Pantsialeyeu, R.I. Vorobey.
[X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State
under Static and Impact Deformation].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 115–125 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State Under Static and Impact Deformation

A.P. Kren¹, M.N. Delendik², O.V. Matsulevich¹, O.K. Gusev², K.U. Pantsialeyeu²,
R.I. Vorobey²

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus*

²*Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus*

Received 04.05.2023

Accepted for publication 07.06.2023

Abstract

Study of the stress field in a plastic imprint and around it is of great practical importance. Processes similar to indentation are used in shot blasting to harden the surface of materials and generate compressive stresses in the surface layers. The purpose of this work was to study the change in the stress-strain state in the area of the plastic imprint with increasing load, in the transition from small to large deformations, as well as to study the change in stress at different strain rates.

X-ray diffraction method was used to study the field of residual stresses generated on the surface of a plastically deformed region – in the zone of an imprint formed when a spherical indenter is pressed into the metal. An analysis of the change in the stress distribution with increasing load in the range of plastic imprint depths of 10–60 μm for steels and aluminum was made. Influence of the loading rate on the change in the values of residual stresses under normal contact of colliding bodies was studied. It is shown that the stress distribution has a complex character with areas of compression and tension of the metal and is determined by the ratio of the indentation depth to its diameter.

The obtained experimental data make it possible to determine the choice of optimal modes of shot blasting, including for increasing the endurance limit of products.

Keywords: deformation, mechanical stress distribution, static and dynamic indentation, X-ray diffraction, surface

Адрес для переписки:

Крень А.П.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь
e-mail: 762-33-00@gmail.com

Address for correspondence:

Kren A.P.
Institute of Applied Physics of the National Academy
of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus
e-mail: 762-33-00@gmail.com

Для цитирования:

А.П. Крень, М.Н. Делендик, О.В. Мацулевич, О.К. Гусев,
К.В. Пантелеев, Р.И. Воробей.
Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения
напряжённого состояния поверхности металла при статическом
и ударном деформировании.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 115–125.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

For citation:

A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev,
K.U. Pantsialeyeu, R.I. Vorobey.
[X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State
under Static and Impact Deformation].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 115–125 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

Введение

Изучение поля напряжений в пластическом отпечатке и вокруг него имеет большое прикладное значение. Процессы, подобные вдавливанию индентора, используются при дробеструйной обработке для упрочнения поверхности материалов и генерации сжимающих напряжений в поверхностных слоях [1 2].

Это способствует повышению твёрдости и снижению риска образования трещин в изделиях. В тоже время существуют ситуации, когда аналогичное индентированию воздействие производится случайным образом, например, при многократном ударе песчаных частиц о лопасти турбин, что вызывает усталостное повреждение поверхности. При этом может наблюдаться обратное явление – при многократном циклическом приложении высокоскоростной нагрузки это может привести к разупрочнению поверхности и возникновению усталостных трещин. Кроме этого, изучение распределения напряжений в области пластического отпечатка важно при разработке методик оценки трещиностойкости с использованием статического и динамического индентирования.

В настоящее время существует ряд работ по изучению напряжённо-деформированного состояния в области пластического отпечатка. В работах [3–6] представлена обширная информация по распределению напряжений, определённых методами моделирования, а именно методом конечных элементов. Имеется ряд публикаций, в которых приведены экспериментальные сведения, полученные с помощью рентгеновских дифрактометров [7].

Однако, эти сведения являются фрагментарными. В этой связи в настоящей работе проведён ряд экспериментов, целью которых являлось изучение изменения напряжения при увеличении нагрузки, при переходе от малых деформаций к большим, а также для различных скоростей деформации (статика и динамика).

Материалы

Для исследований были взяты образцы из углеродистой стали У8 с твёрдостью по Бринеллю 175 НВ, из стали 45 с твёрдостью 240 НВ и алюминиевого сплава Д16 с твёрдостью 42 НВ. Размеры образцов составили 120×80×18 мм, 120×80×18 мм и 70×70×20 мм соответственно.

Перед проведением измерений образцы прошли отжиг для снятия напряжений и полировались до шероховатости поверхности $R_a 0,5$. После этого проводилось травление поверхности электролитом типа К1 (основной компонент – перхлорная кислота) производства QATM.

Приборы и методы исследования

Ударное вдавливание производилось с помощью прибора ИПМ, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Индентор был выполнен из карбида вольфрама, диаметр сферического наконечника составлял 2,3 мм, а масса 4,3 г. Разгон индентора производился под действием силы тяжести. Прибор позволяет регистрировать полный цикл нагружения материала от начала контакта индентора с материалом до выхода из этого контакта. При этом фиксируются мгновенные значения скорости, контактного усилия и перемещения во времени. Подробное описание прибора можно найти в [8, 9].

Статическое вдавливание осуществлялось с помощью универсальной испытательной машины TIME WDW. Индентор закреплялся на одной из плит (рисунок 1а), после чего производилось нагружение. Использовалось два индентора: один стандартный твердосплавной шарик диаметром $D = 10$ мм, используемый при измерении твёрдости по Бринеллю, второй – индентор диаметром $D = 2,3$ мм, который использовался при ударном вдавливании. При индентировании индентором диаметром $D = 2,3$ мм нагрузка эмпирически подбиралась таким образом, чтобы глубина остаточного отпечатка примерно совпадала при ударе и статическом нагружении.

Диаметр образующегося отпечатка (рисунок 1б) регистрировался с помощью металлографического микроскопа МИ-1, производства «Оптоэлектронные системы» (Беларусь). Измерение глубины (профиля) остаточного отпечатка производилось с помощью лазерного измерителя расстояния, входящего в состав рентгеновского дифрактометра GNR STRESS X (Италия), который также использовался при оценке создаваемых остаточных напряжений на поверхности метал-ла. Технические характеристики дифрактометра представлены в таблице 1.

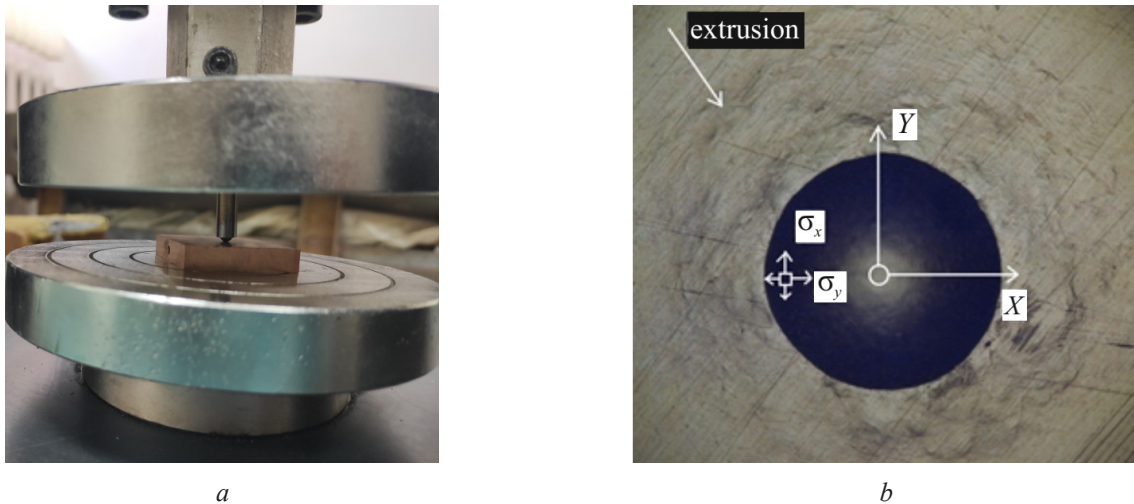


Рисунок 1 – Индентирование материалов: *a* – схема нагружения; *b* – отпечаток на стали

Figure 1 – Indentation of materials: *a* – loading scheme; *b* – imprint on steel

Таблица 1/Table 1

Характеристики сканирования

Scan characteristics

Параметры / Parameters	Значения / Values
Роботизированный гониометр / Robotic Goniometer	Программируемый пси-скан -45°/+45° Programmable Psi-Scan -45°/+45°
Детектор / Detector	Многополосный Dectris Mythen Multiband Dectris Mythen
Плоскость / Plane	Сталь / Steel – {211} Алюминий / Aluminum – {311}
Угол дифракции / Diffraction angle	Сталь / Steel – 156° Алюминий / Aluminum – 140°
Диапазон сканирования / Scan Range	Сталь / Steel – 152° – 160° Алюминий / Aluminum – 136° – 144°
Шаг сканирования / Scan step	0,15°
Осцилляции / Oscillations	2°

Результаты измерений

На рисунке 1*b* показаны характерные изображения отпечатков, полученные с помощью оптического микроскопа. Видно образование навала вокруг отдельных отпечатков, который можно проанализировать исходя из данных представленных на рисунке 2, где показаны объёмные профили отпечатков. Эти же отпечатки использовались в дальнейшем для анализа

формирующихся остаточных напряжений на пластически деформированной поверхности.

Как видно из рисунка 2, для ударного индентирования стали У8 характерно наличие небольшого навала по краям отпечатка (рисунки 2*c* и *d*), который практически незаметен при статическом вдавливании (рисунки 2*a* и *b*). При этом для Д16Т такой навал практически отсутствует как для динамического, так и статического индентирования (рисунки 2*e*, *f*, *g*, *h*).

При этом, отсчитываемая от исходной поверхности глубина отпечатка, образующаяся при ударе, во всех случаях меньше, чем при плавном

вдавливании индентора (при примерно равном значении контактного усилия, развиваемом при ударном и статическом индентировании).

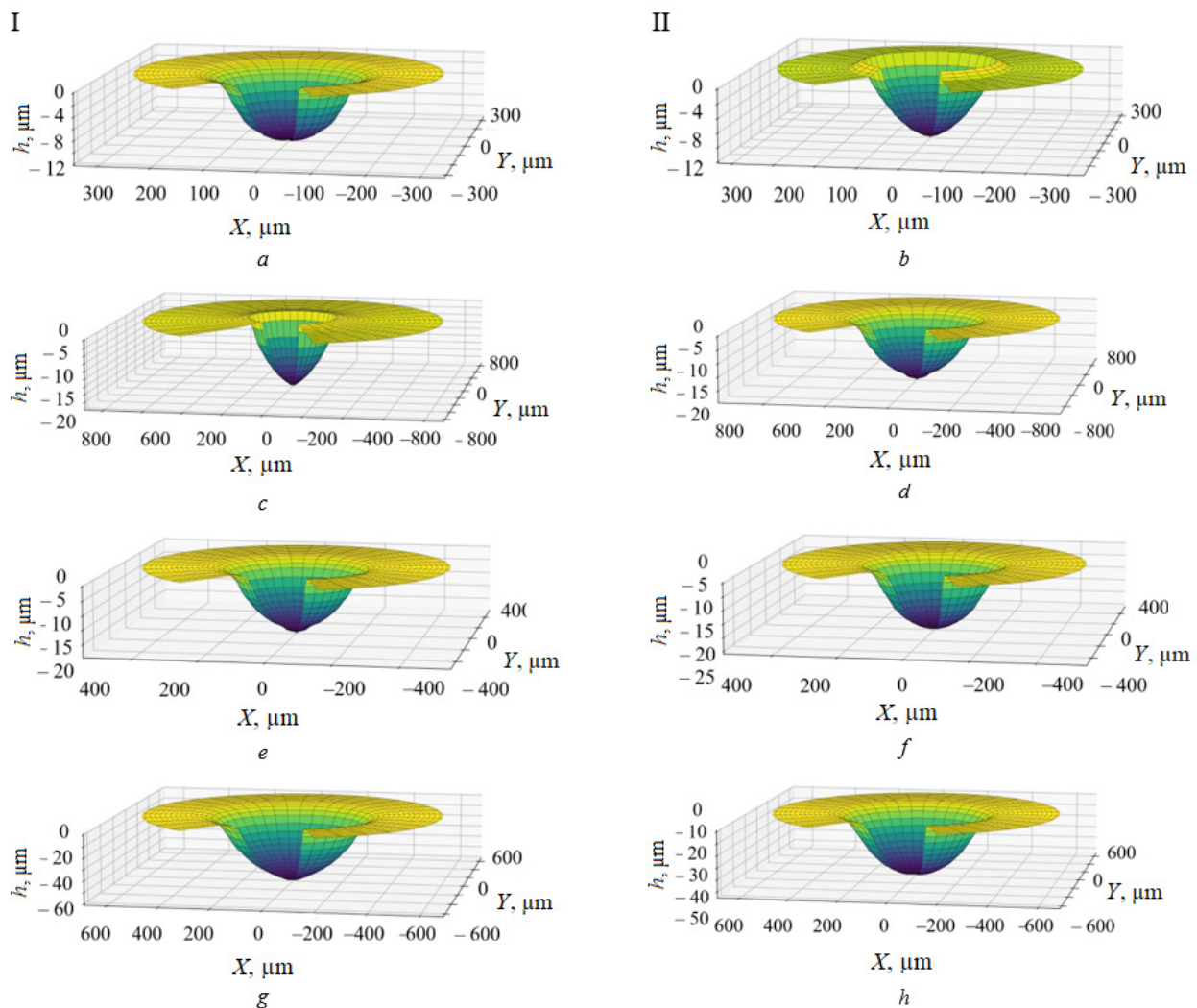


Рисунок 2 – Объёмный профиль отпечатков, полученных при индентировании стали У8 (*a, b, c, d*) и Д16Т (*e, f, g, h*): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

Figure 2 – Volumetric profile of indentations obtained during indentation of steel U8 (*a, b, c, d*) and D16T (*e, f, g, h*): I – static indentation; II – dynamic indentation

Для динамического индентирования стали У8 развиваемое усилие P составило 18 и 34 Н, при этом образовался пластический отпечаток глубиной h 10 и 19 мкм (рисунок 2*b, d*), для статического – усилие 15 и 30 Н (рисунок 2*a, b*), глубина отпечатка 12 и 22 мкм соответственно. При ударном вдавливании сферического индентора в алюминиевый сплав величина P была 9 и 18 Н, а h – 25,5 и 54 мкм (рисунок 2*f, h*), для статического: P – 8 и 19 Н (рисунок 2*a, b*), h – 24 и 60 мкм соответственно (рисунок 3*e, g*).

Используя эти и другие параметры отпечатка, представленные в таблице 2, можно рассчитать твёрдость материала по шкале Бринелля.

Как видно из таблицы 2 для стали У8 динамическая твердость превышает статическую в $\approx 1,4$ раза, что соответствует известным данным, как и тот факт, что для алюминия статическая и динамическая твёрдость практически совпадают. Кроме этого, измеренная твёрдость соответствует значениям, полученным при макроиспытаниях. Как было сказано ранее, она составляет 175 единиц для стали и 42 единицы

для алюминиевого сплава. Это подтверждает верность выполненных геометрических

измерений при определении параметров отпечатков.

Таблица 2/Table 2

Основные параметры отпечатков и расчётная твёрдость материала по шкале Бринелля

The main parameters of the prints and the calculated hardness of the material on the Brinell scale

Материал Material	Динамическое индентирование Dynamic indentation			Статическое индентирование Static indentation		
	P , Н	d , мкм	HB , ед	P , Н	d , мкм	HB , ед
Сталь У8 Steel U8	18	310	237	15	330	174
Сплав Д16 Alloy D16	9	500	45	8	490	42
	18	704	46	19	760	41

Измерение остаточных напряжений проводилось вдоль оси X и Y (рисунок 2) по диаметру отпечатка. Использовалась методика, изложенная в европейском стандарте *EN 15305:2008 «Non-destructive Testing – Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction»*. Режим измерения – w , энергия излучения – 30 кэВ, при которой глубина проникновения в материал оставляла примерно 15 мкм. Измерения проводились при углах от -45° до $+45^\circ$, при осцилляциях $\pm 2^\circ$. Пример дифракционного пика, полученного внутри отпечатка и в месте, не подвергшемся деформации, показан на рисунке 3.

На рисунках 4 и 5 показан характер изменения напряжений вдоль оси x и y – σ_{xx} и σ_{yy} . На рисунке 6 и 7 показано изменение напряжений относительно профиля поверхности отпечатка.

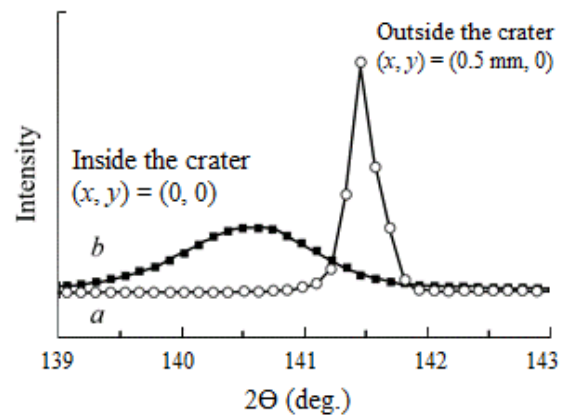
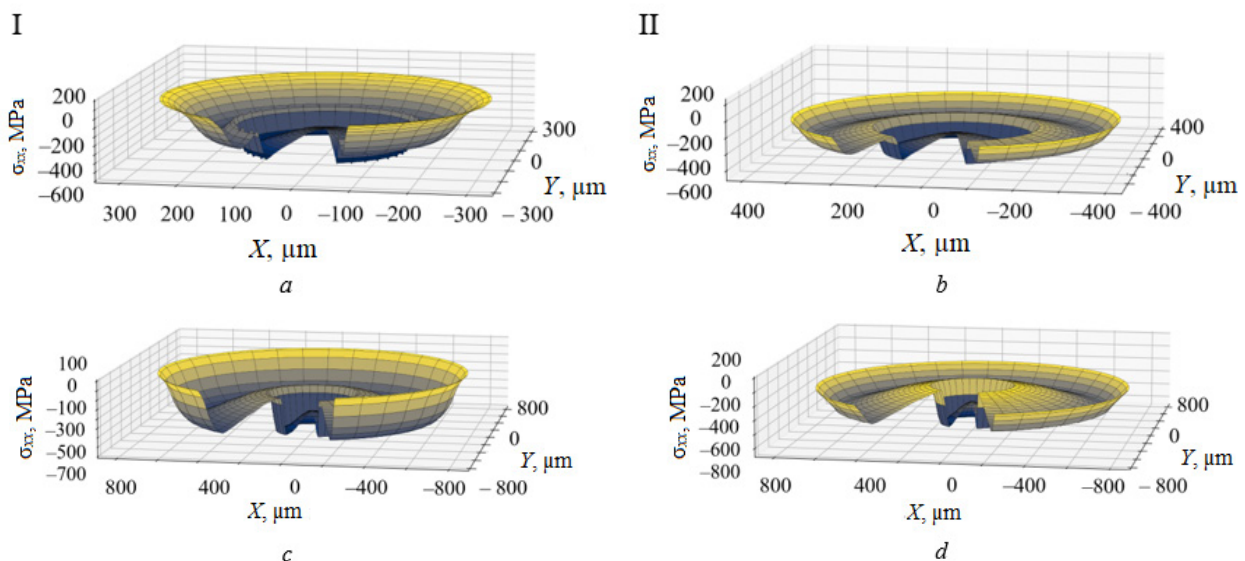


Рисунок 3 – Пример дифракционного пика в различных точках образца: a – в отпечатке; b – вне отпечатка

Figure 3 – An example of a diffraction peak at different points of the sample: a – in the imprint; b – outside the imprint



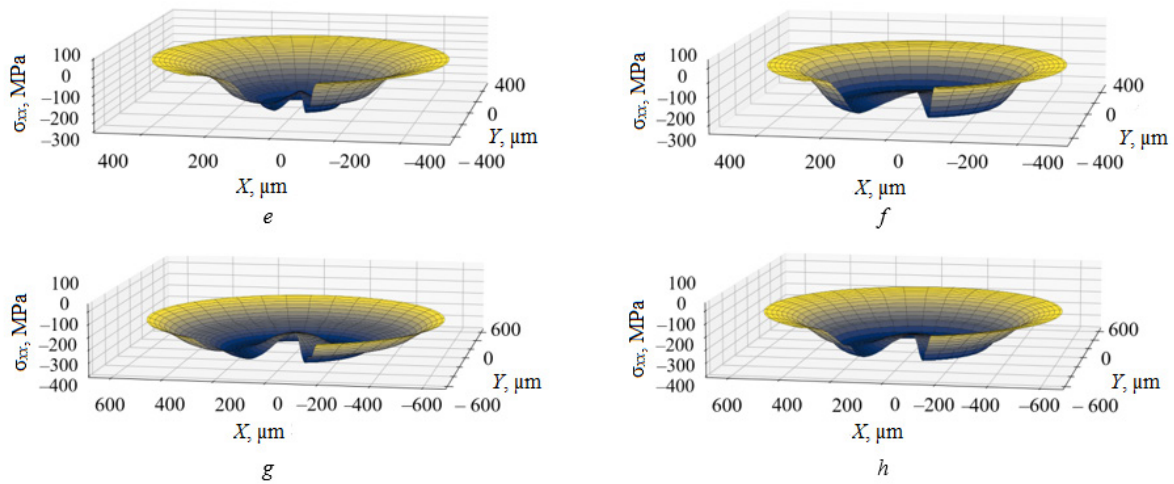


Рисунок 4 – Измеренное с помощью дифрактометра распределение σ_{xx} в отпечатках, полученных при индентировании стали (*a, b, c, d*) и алюминия (*e, f, g, h*): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

Figure 4 – Distribution of σ_{xx} measured using a diffractometer in prints obtained by indenting steel (*a, b, c, d*) and aluminum (*e, f, g, h*): I – static indentation; II – dynamic indentation

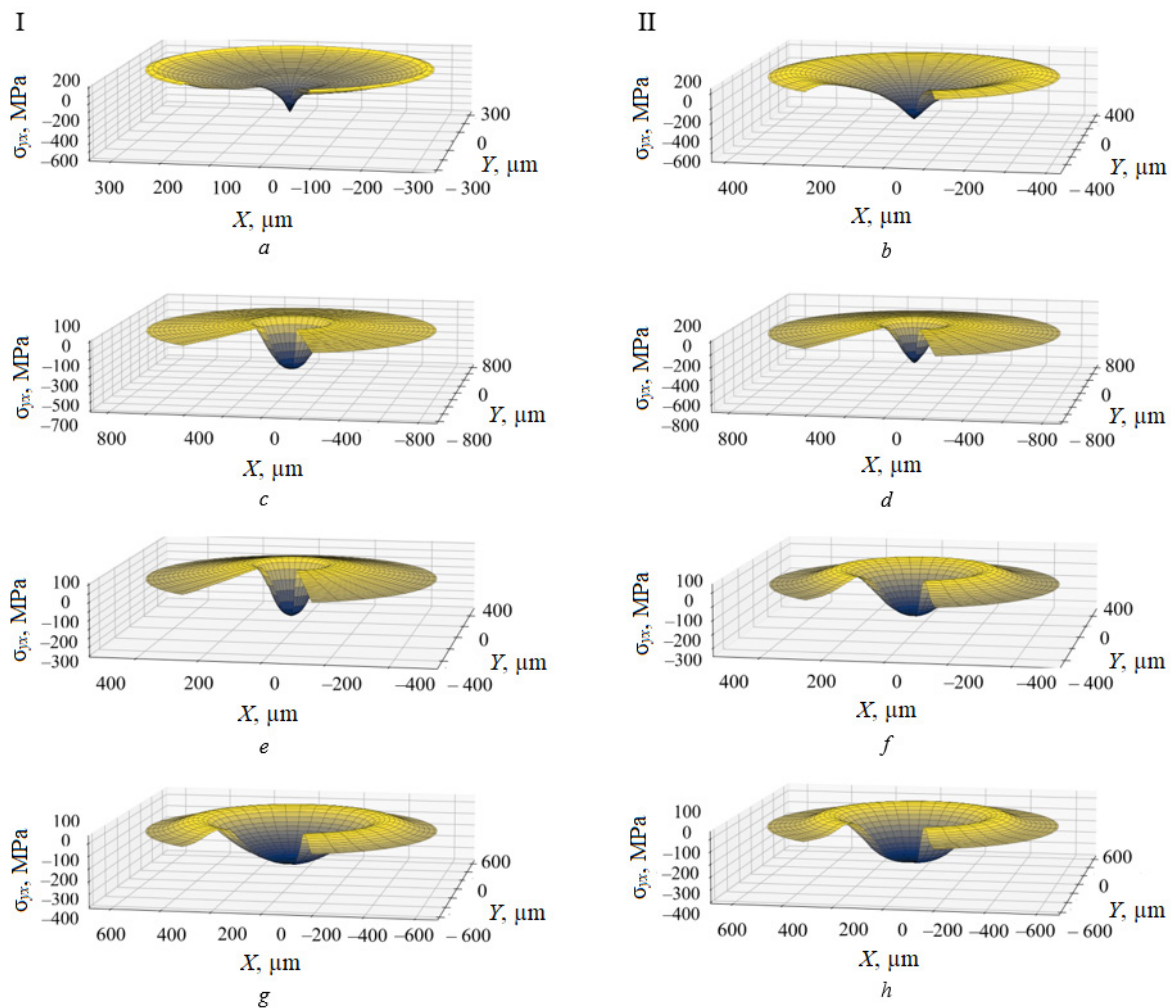


Рисунок 5 – Измеренное с помощью дифрактометра распределение σ_{yx} в отпечатках, полученных при индентировании стали (*a, b, c, d*) и алюминия (*e, f, g, h*): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

Figure 5 – Distribution of σ_{yx} measured using a diffractometer in indentations obtained by indenting steel (*a, b, c, d*) and aluminum (*e, f, g, h*): I – static indentation; II – dynamic indentation

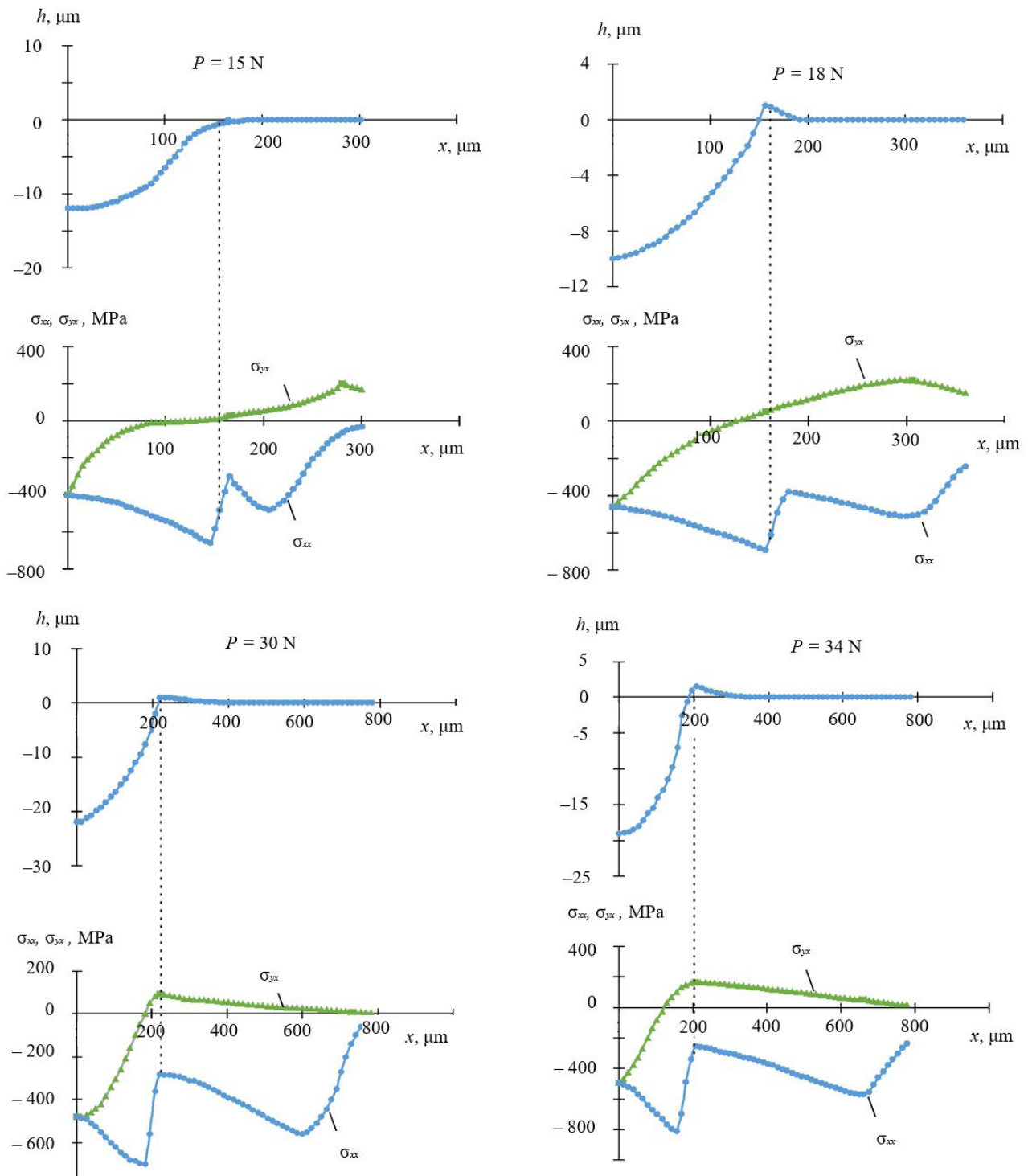


Рисунок 6 – Профиль отпечатка и распределение напряжений для стали У8: *a* – статическое вдавливание; *b* – ударное индентирование

Figure 6 – Indentation profile and stress distribution for steel U8: *a* – static indentation; *b* – impact indentation

Во всех случаях, представленных на рисунках 6 и 7, соотношение глубины отпечатка к его диаметру h/d находится в диапазоне 0,032–0,078. В этой связи были выполнены эксперименты по изучению изменения

напряжений при более низких нагрузках. Как видно из рисунка 8, где представлен профиль σ_{xx} и σ_{yx} , при уменьшении соотношения h/d напряжения в отпечатке становятся растягивающими.

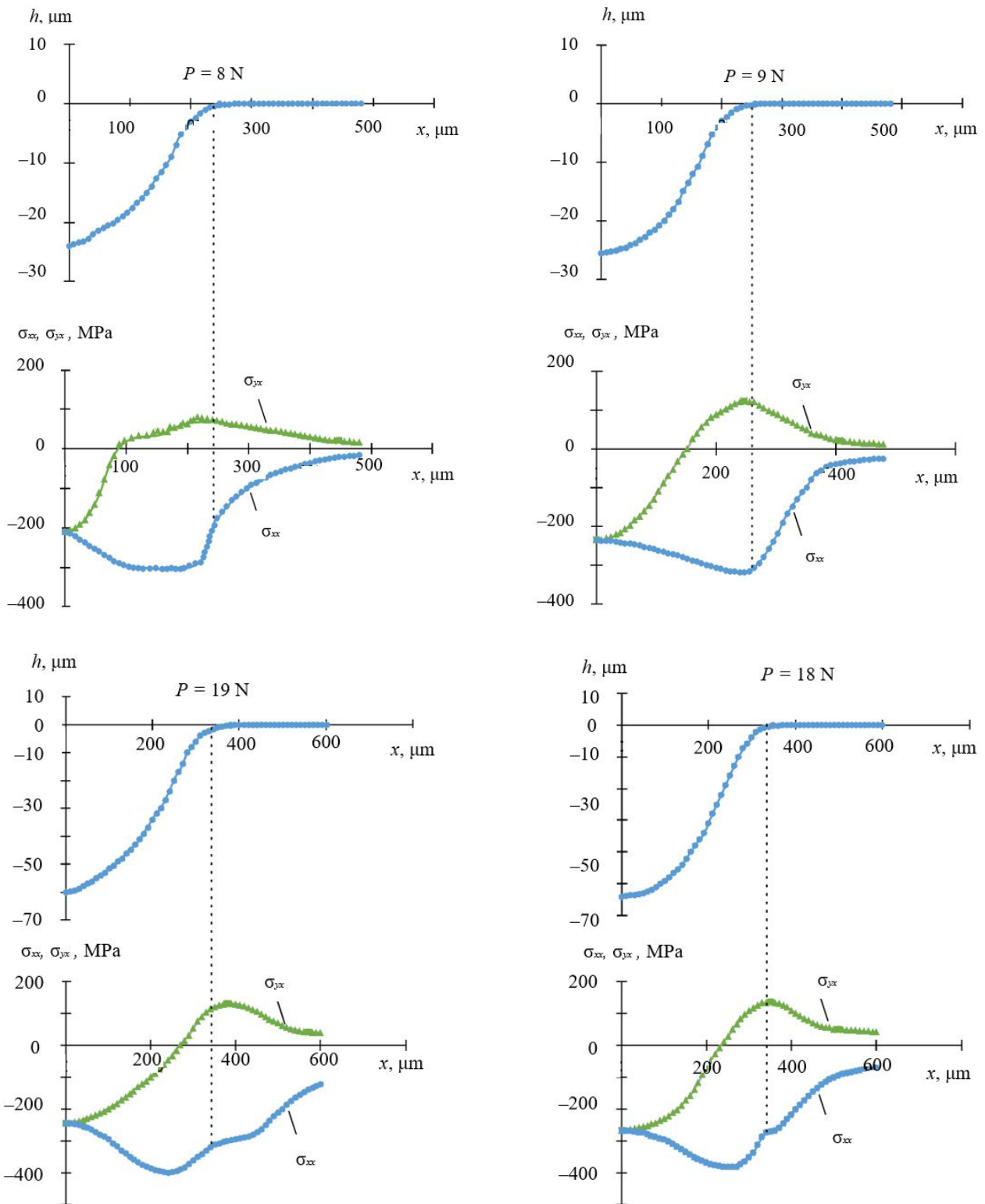


Рисунок 7 – Профиль отпечатка и распределение напряжений для Д16Т: *a* – статическое вдавливание; *b* – ударное индентирование

Figure 7 – Indentation profile and stress distribution for D16T: *a* – static indentation; *b* – impact indentation

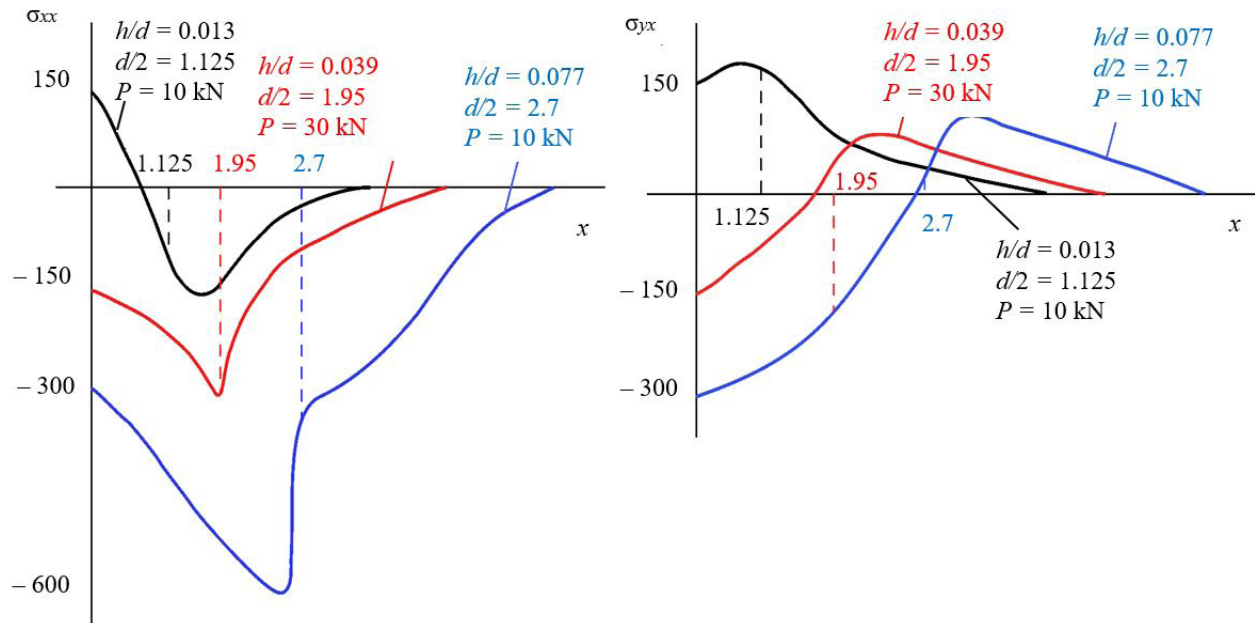


Рисунок 8 – Распределение напряжений на поверхности отпечатка в зависимости от соотношения h/d для стали 45 при статическом индентировании индентором диаметром 10 мм

Figure 8 – Distribution of stresses on the imprint surface, depending on the ratio h/d for steel 45 during static indentation with an indenter having diameter of 10 mm

Этот факт, очевидно, необходимо учитывать при выборе параметров дробеструйной обработки, поскольку растягивающие напряжения могут вызвать растрескивание поверхности материала, так же как и наличие окружных растягивающих напряжений на краях отпечатка. Можно предположить, что переход напряжений от сжимающих к растягивающим происходит в диапазоне $h/d \approx 0,025–0,018$.

Заключение

Рассмотрен механизм формирования остаточных напряжений на поверхности пластического отпечатка и в прилегающей к нему зоне при однократном нагружении материала. Показано, что при статическом и динамическом (со скоростью деформации до 10^3 c^{-1}) приложении нагрузки величина напряжений при условии создания примерно равных деформаций практически совпадает.

Наблюдается достаточно сложный характер изменения напряжений: при соотношении глубины h пластического отпечатка к его диаметру d более 0,025 радиальные напряжения в отпечатке и за его пределами являются сжимающими с резким изменением на краях

отпечатка, окружные напряжения внутри отпечатка преимущественно сжимающие и переходят в растягивающие на его краях.

При $h/d < 0,025$ радиальные напряжения в центре отпечатка переходят в растягивающие, а осевые являются растягивающими как в отпечатке так и за его пределами.

Получение данных соотношений играет большую роль для выбора оптимальных режимов дробеструйной обработки и повышения предела выносливости изделий.

References

1. Kobayashi M., Matsui T., Murakami Y. Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening. *International Journal of Fatigue*, 1998, vol. 20, no. 5, pp. 351–357.
2. Goulmy J.P., Boyer V., Retraint D., Kanoute P., Toulbi L., Rouhaud E. Modeling of the shot peening of a nickel alloy with the consideration of both residual stresses and work hardening. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, vol. 264, p. 112120. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2023.112120
3. Mahmoudi A.H., Ghasemi A., Farrahi G.H., Sherafatnia K. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening. *Materials & Design*, 2016, vol. 90, pp. 478–487. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.162

4. Feng G., Qu S., Huang Y., Nix W.D. An analytical expression for the stress field around an elastoplastic indentation/contact. *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, iss. 9, pp. 2929–2938.

DOI: 10.1016/j.actamat.2006.12.030

5. Gang Feng, Shaoxing Qu, Yonggang Huang, William D. Nix. A quantitative analysis for the stress field around an elastoplastic indentation/contact. *Journal of Materials Research*, 2009, vol. 24, iss. 3, pp. 704–718.

DOI: 10.1557/jmr.2009.0097

6. Munawar Chaudhri M. Subsurface plastic strain distribution around spherical indentations in metals. *Philosophical Magazine A*, 1996, vol. 74, iss. 5, pp. 1213–1224.

DOI: 10.1080/01418619608239721

7. Boyce B.L., Chen X., Hutchinson J.W., Ritchie R.O. The residual stress state due to a spherical hard-body impact. *Mechanics of Materials*, 2001, vol. 33, iss. 8, pp. 441–454. **DOI:** 10.1016/S0167-6636(01)00064-3

8. Kren A., Delendik M., Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, vol. 162, p. 104141.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104141

9. Kren A., Machikhin A., Marchenkov A. Impact indentation of metals in the transition region from the elastic to plastic state. *Journal of Materials Science*, 2023, vol. 58(2), pp. 961–970.

DOI: 10.1007/s10853-022-08122-7