



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

## INVESTIGATION OF SURFACE HARDENING EFFECT ON THE LOCAL MECHANICAL PROPERTIES OF THE CUTTING TOOLS WORKING EDGE

К.С.Кравчук\*, к.ф.-м.н., науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-9956-9939), И.В.Красногоров\*, мл. науч. сотр., А.А.Русаков\*, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-5702-1353), А.С.Усеинов\*, к.ф.-м.н., первый заместитель директора по научной работе ФГБНУ ТИСНУМ, (ORCID: 0000-0002-9937-0954) / useinov@mail.ru  
 K.S.Kravchuk\*, Researcher, Cand. of Sc. (Physics and Mathematics), I.V.Krasnogorov\*, Junior Researcher, A.A.Rusakov\*, Junior Researcher, A.S.Useinov\*, Cand. of Sc. (Physics and Mathematics), First Deputy Director for Scientific Work of the FSBSI TISNУM

DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.7-8.434.441

Получено: 25.11.2020 г.

В работе методом инструментального индентирования исследовались механические свойства режущей кромки вырубного штампа, модифицированной с помощью механического воздействия фрезерного инструмента и локального нагрева лазером. Построены профили твердости от глубины с помощью метода автоматизированного картографирования. Установлено, что обработка острия локальным нагревом с помощью лазера приводит к увеличению твердости сплава в 1,5 раза в области размером около 40 мкм.

In this work the mechanical properties of the punching die cutting edge were investigated by instrumental indentation. The near-surface layer of punching dies is modified in the process of mechanical action with a milling tool and local heating by a laser. Profiles of the hardness on depth have been constructed using the method of automated mapping. It was found that the processing of the tip by local laser heating leads to an increase in the hardness of the alloy by a factor of 1.5 in the region of about 40  $\mu\text{m}$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Локальное упрочнение ответственных участков поверхности, подвергающихся повышенным механическим нагрузкам, является одним из важнейших этапов при производстве инструмента, узлов и деталей машин и механизмов.

В основном методы упрочнения поверхностей можно разбить на две основные группы:

- упрочнение изделия без изменения химического состава поверхности, но с изменением

структуры. Упрочнение достигается поверхностной закалкой, поверхностным пластическим деформированием и другими методами;

- упрочнение изделия с изменением химического состава поверхностного слоя и его структуры. Упрочнение осуществляется различными методами химико-термической обработки и нанесением защитных слоев.

Деформация поверхности – один из наиболее простых способов, при котором прочностные

\* Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов" / Scientific Work of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNУM.



характеристики поверхности возрастают. Основное назначение поверхностного пластического деформирования – повышение усталостной прочности путем наклепа поверхности на глубину 100–300 мкм. Разновидностями такой обработки являются дробеструйная обработка, обработка роликами, микрофрезерование, накатка рельефа и др.

Другим распространенным методом поверхностного упрочнения является локальная термическая обработка. В современных технологических процессах для локального нагрева применяют лазеры. Лазер – высокопроизводительный, точный, гибкий и чистый источник тепла, имеющий широкое применение в промышленности. С появлением дешевых, надежных и энергоэффективных лазеров их применение в промышленности постоянно растет [1]. Инструменты на основе лазеров используются при резке, сварке, наплавке, легировании, сверлении и пайке [2–4]. Данные процессы можно проводить на областях в масштабе от миллиметрового до микронного размера, в зависимости от типа, мощности, газовой среды и режима работы лазера [5–9].

Лазер активно применяется для локального упрочнения изделий из инструментальной стали. Обработка поверхности лазером увеличивает твердость, стойкость к коррозии и механическому износу [10]. Лазерное

упрочнение – процесс аналогичный обычной сквозной закалке, но проводится в ограниченной области и на порядок быстрее. Лазер нагревает область до температуры фазового перехода без плавления металла. При охлаждении аустенит превращается в мартенсит, что дает увеличение твердости и образование на поверхности остаточного сжимающего напряжения, связанного с увеличением объема [1, 11, 12].

Помимо лазерного нагрева на поверхностное упрочнение также влияет механическая обработка при формировании кромки. Деформация и нагрев при взаимодействии с фрезерным инструментом также может изменить свойства материала на поверхности [13–15].

Локальное упрочнение узкой режущей кромки активно применяется в производстве вырубных штампов штанцевальных машин. Штанцевание – высекание (вырубка) заготовки по внешнему контуру ударом штампа по листовому материалу: бумаге, картону, полимерной пленке. Качество режущей кромки один из главных параметров, определяющих надежность и производительность штанцевальной машины.

В данной работе приведены результаты применения автоматизированных алгоритмов картирования твердости и модуля упругости для исследования локальных механических свойств поверхностно упрочненного инструмента методами

## INTRODUCTION

Local hardening of critical areas of the surface that are exposed to increased mechanical stress is one of the most important stages in production of tools, units and parts of machines and mechanisms.

Basically, surface hardening methods can be divided into two main groups:

- hardening of a product without changing the chemical composition of the surface but with changing its structure. Hardening is achieved by surface hardening, surface plastic deformation and other methods;
- hardening of a product by changing the chemical

composition of the surface layer and its structure. Hardening is carried out by various methods of chemical-thermal treatment and application of protective layers.

Surface deformation is one of the simplest ways to improve the surface strength characteristics. The main purpose of surface plastic deformation is to increase the fatigue strength by work hardening the surface to a depth of 100–300  $\mu\text{m}$ . The types of such processing are shot blasting, roller processing, micromilling, relief knurling, etc.

Localized heat treatment is still another common surface hardening method. In modern

technological processes local heating is accomplished by lasers. The laser is a high performance, accurate, flexible and clean heat source with a wide range of industrial applications. With the advent of cheap, reliable and energy efficient lasers, their industrial use is constantly growing [1]. Laser-based tools are used in cutting, welding, surfacing, alloying, drilling and brazing [2–4]. These processes can be carried out on areas ranging from a millimeter to a micron, depending on the type, power, gas medium, and operating mode of the laser [5–9].

The laser is actively used for local hardening of tool steel

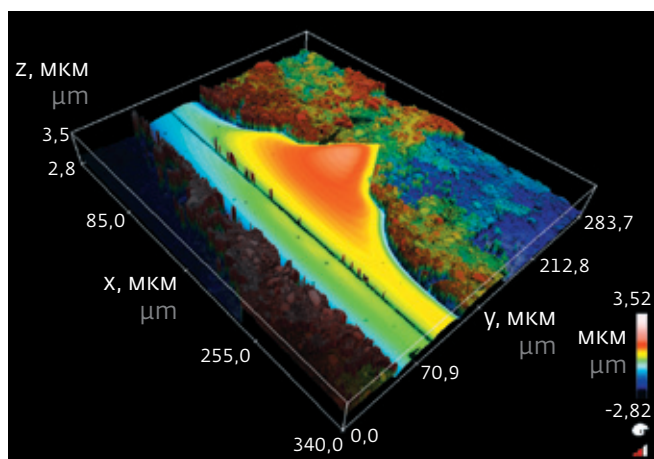


Рис.1. Изображение поверхности образца в заливке  
Fig.1. Image of the sample surface in the epoxy moulds

механического микрофрезерования и локального лазерного нагрева.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе пробоподготовки была проведена горячая запрессовка образцов вырубных штампов на станке MECAPRESS 3 (PRESI, Франция), материал запрессовки – фенольная смола (твердость 90 Шор D). Образцы заливались перпендикулярно плоскости образца и перпендикулярно режущей кромки.

Поверхность образцов обработана на полировально-шлифовальном оборудовании фирмы Struers (Швейцария). Шероховатость после

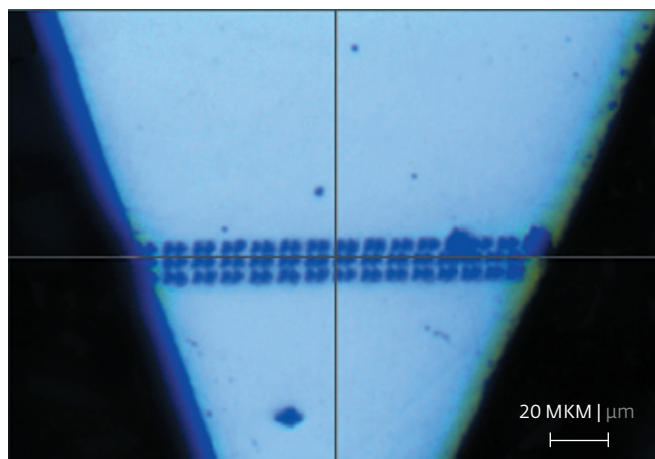


Рис.2. Микрофотография серии отпечатков при построении профиля твердости № 1  
Fig.2. Micrograph of a series of indentations for hardness profile No. 1

полировки контролировалась по трехмерным изображениям поверхности образца (рис.1), полученным на оптическом профилометре S neox (Sensofar, Испания). Цвет и яркость на изображении показывает высоту и неровность поверхности. Видны завалы образца на краю образца. Шероховатость поверхности Ra образца по данным оптического профилометра не превышает 1 нм.

Измерения твердости и модуля упругости (Юнга) проводились на нанотвердомере "НаноСкан-4D" (ТИСНУМ, Россия) [16-20]. Измерения проводились методом

products. Laser surface treatment increases hardness, resistance to corrosion and mechanical wear [10]. Laser hardening is a process similar to conventional through hardening, but it is carried out in a limited area and an order of magnitude faster. The laser heats the area to the phase transition temperature without melting the metal. Upon cooling, austenite turns into martensite, which gives an increase in hardness and the formation of residual compressive stress on the surface associated with an increase in volume [1, 11, 12].

In addition to laser heating, surface hardening is also influenced by machining during edge shaping. Deformation and heating, when interacting with milling tools, can also change the surface properties of materials [13-15].

Local hardening of a narrow cutting edge is widely used in production of punching dies of the punching machines. Punching means cutting a workpiece around the outer contour by hitting a die on a sheet material: paper, cardboard or polymer film. The cutting edge quality is one of the main parameters that

determine reliability and productivity of the die cutting machine.

This paper presents the results of using automated algorithms for mapping hardness and elastic modulus to study the local mechanical properties of a surface-hardened tool using mechanical micro-milling and local laser heating.

### RESEARCH METHODS

In the course of sample preparation, hot pressing of punching dies samples was carried out on a MECAPRESS 3 machine (PRESI, France), the material of the pressing was phenolic resin (hardness

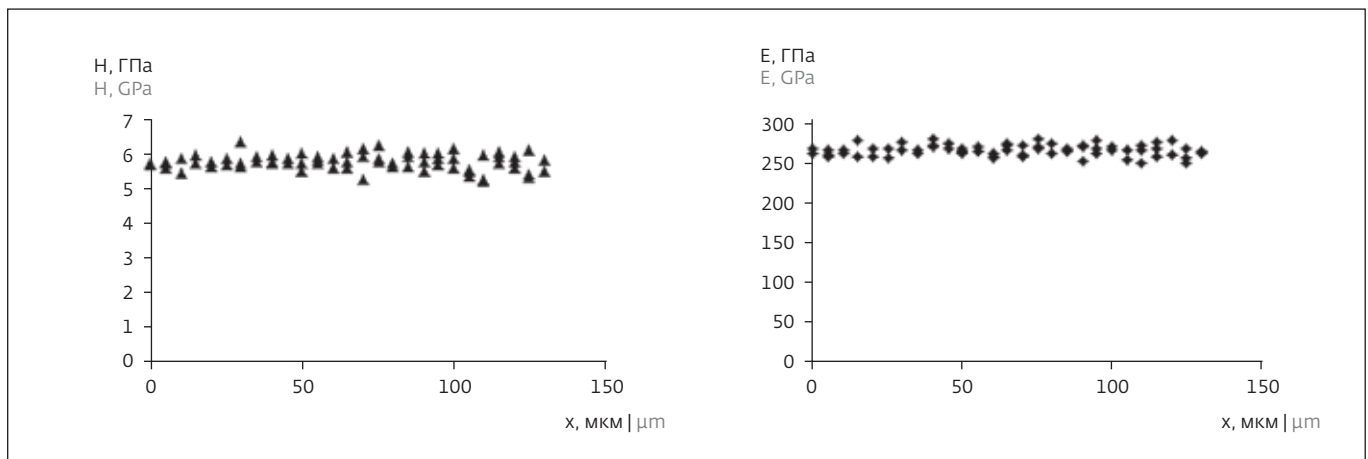


Рис.3. Зависимость твердости и модуля упругости от координаты (профиль № 1)

Fig.3. Dependence of hardness and elastic modulus on the coordinate (profile No. 1)

инструментального индентирования в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011, известном также как метод наноиндентирования [21]. Данный метод основан на вдавливании алмазного пирамидального наконечника в материал с одновременным измерением глубины и силы нагружения. Анализ кривой нагружения-разгружения позволяет вычислить величину твердости и модуль упругости материала, а также коэффициент упругого восстановления, работу деформации и ряд других менее значимых параметров материала.

Позиционирование области испытаний проводилось с помощью видеоизображения оптического микроскопа. Благодаря высокоточной

системе позиционирования образца, точность установки координат измерения составляет не более 1 мкм. Для того чтобы соседние измерения не влияли друг на друга, уколы следует располагать на расстоянии более трех размеров отпечатков друг от друга.

Измерение профилей твердости проводилось с помощью автоматизированных алгоритмов, позволяющих выполнять большие серии измерений без участия оператора [22, 23].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение серии испытаний в автоматическом режиме с регистрацией координат позволяет

90 Shore D). Samples were filled perpendicular to the sample plane and perpendicular to the cutting edge.

The sample surface was processed on the polishing and grinding equipment manufactured by Struers (Switzerland). The roughness after polishing was controlled by three-dimensional images of the sample surface (Fig.1) obtained with a S neox optical profilometer (Sensofar, Spain). The color and brightness in the image shows the height and unevenness of the surface. Sample blockages are visible at the edge of the sample. The

roughness of the surface Ra of the sample according to the optical profilometer does not exceed 1 nm.

Measurements of hardness and modulus of elasticity (Young) were carried out on a nano-hardness tester "NanoScan-4D" (TISNUM, Russia) [16-20]. Measurements were carried out by the instrumental indentation method in accordance with GOST R 8.748-2011, also known as the nanoindentation method [21]. This method is based on indenting a pyramidal diamond tip into the material while simultaneously measuring the depth and

loading force. The analysis of the loading-unloading curve allows you to calculate hardness and elastic modulus of the material, as well as the coefficient of elastic recovery, the work of deformation and a number of other less significant parameters of the material.

Positioning of the test area was carried out using a video image of an optical microscope. Due to the high-precision sample positioning system, accuracy of the measurement coordinates is no more than 1 μm. In order for adjacent measurements not to influence each other, pricks should be



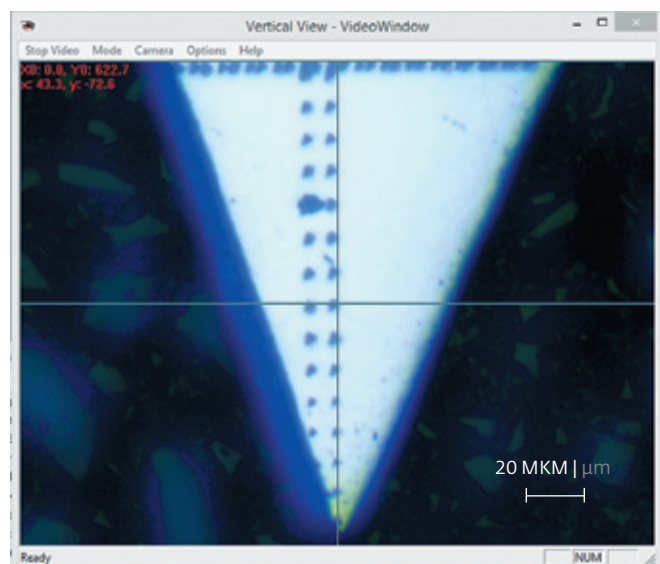


Рис.4. Микрофотография серии отпечатков при построении профиля твердости № 2

Fig.4. Micrograph of a series of indentations for hardness profile No. 2

исследовать неоднородность свойств образца по поверхности. К подобным исследованиям относятся процедуры картирования и измерение профиля твердости. Картирование – проведение индентов с одинаковой нагрузкой по регулярной сетке, профиль твердости – проведение серии испытаний вдоль выбранного направления с постоянным шагом. Увеличить пространственное разрешение при измерении профиля

твердости можно с помощью увеличения количество испытаний, например с помощью дополнительных рядов индентов, смещенных относительно соседних рядов.

На образце вырубного штампа в автоматическом режиме проведены серии индентов вдоль и поперек режущей кромки с нагрузкой 50 мН. На рис.2 приведена микрофотография серии отпечатков после построения профиля твердости № 1 поперек выступа вырубного штампа. На рис.3 приведены соответствующие профили твердости и модуля упругости, рассчитанные по результатам серии укулов. Как видно из графиков на рис.3, разница в твердости в центре и на краю образца не обнаруживается.

На рис.4 приведена микрофотография серии отпечатков после построения профиля твердости № 2 вдоль штампа. На рис.5 приведены соответствующие профили твердости и модуля упругости.

Координата 0 оси абсцисс графиков на рис.5 соответствует некоторой точке в массиве образца. Увеличение координаты означает приближение к краю образца, то есть к режущей кромке вырубного штампа. На графике (слева) видно, что значение твердости увеличивается с  $5,5 \pm 0,5$  ГПа в глубине образца до  $9,2 \pm 0,7$  ГПа на краю, в области размером  $40 \pm 5$  мкм. Увеличение твердости также явно видно по размеру отпечатков на фотографии (рис.4): размер отпечатков уменьшается при неизменной силе нагружения. В то же время наблюдаемое уменьшение значения модуля упругости на 10% является незначительным и может быть связано не столько с изменением свойств

located at a distance of more than 3 sizes of imprints from each other.

The measurement of hardness profiles was carried out using automated algorithms that allow large series of measurements to be performed without participation of the operator [22, 23].

## RESULTS AND DISCUSSION

Carrying out a series of tests in automatic mode with registration of coordinates makes it possible to investigate heterogeneity of the sample properties over the surface. Such studies include mapping procedures

and measuring the hardness profile. Mapping is achieved by carrying out indents with the same load on a regular grid, hardness profile and in series of tests along the selected direction at a constant step. It is possible to improve a spatial resolution when measuring the hardness profile by increasing the number of tests, for example, with the help of additional rows of indents offset relative to adjacent rows.

A series of indents along and across the cutting edge with a load of 50 mN were drawn on a sample of a punching die in an

automatic mode. Fig.2 shows a photomicrograph of a series of indentations after building a hardness profile No. 1 across the projection of the punching die. Figure 3 shows the corresponding profiles of hardness and modulus of elasticity calculated from the results of a series of punctures. As can be seen from the graphs in Fig.3, there is no difference in hardness in the center and at the sample edge.

Figure 4 shows a photomicrograph of a series of imprints after building a hardness profile No. 2 along the stamp. Figure 5 shows

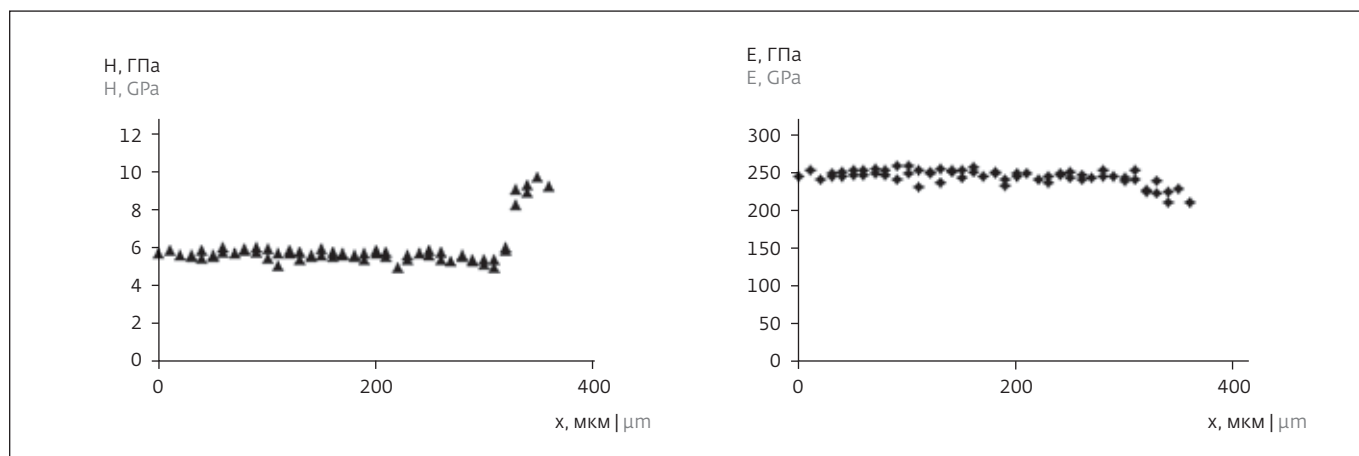


Рис.5. Зависимость твердости и модуля упругости от координаты (профиль № 2)

Fig.5. Dependence of hardness and elastic modulus on the coordinate (profile No. 2)

материала, сколько с локальным наклоном поверхности в области края образца. Известно, что такой наклон всегда возникает на краях при механической полировке при пробоподготовке, а расчет значения модуля упругости по методу инструментального индентирования чрезвычайно чувствителен к наклону кривой нагружения, который, в свою очередь, зависит от угла между осью индентора и плоскостью образца.

### ВЫВОДЫ

В данной работе в автоматическом режиме индентирования проведена серия измерений твердости и модуля упругости с целью построения профиля распределения механических свойств вблизи режущих кромок вырубных штампов. Исследованные кромки подвергались поверхностному упрочнению методом механического микрофрезерования (боковая сторона штампа) и методом локального лазерного нагрева (режущая кромка).

Показано, что автоматизированное картографирование краевой области позволяет идентифицировать локальные изменения механических свойств приповерхностного слоя (твердости и модуля упругости) с пространственным разрешением порядка 3–5 мкм). Пространственное разрешение зависит от выбранной нагрузки индентирования и, соответственно, расстояния между соседними измерениями с учетом критерия, при котором соседние измерения не влияют друг на друга. Показано, что повысить пространственное разрешение можно путем промера нескольких серий уколов, смещенных относительно соседних на величину, меньшую расстояния между уколами.

Полученные зависимости твердости от расстояния до режущей кромки позволяют определить глубину приповерхностного слоя, свойства которого были модифицированы в результате обработки. В частности, в данной работе показано, что микрофрезерная обработка стенок штампа фрезой не приводит к ее упрочнению, в то время как локальный лазерный нагрев существенно повышает твердость кромки по сравнению с твердостью в объеме материала (с  $5,5 \pm 0,5$  ГПа до  $9,2 \pm 0,7$  ГПа). При этом по полученным профилям твердости можно определить, что толщина приповерхностного слоя, в котором происходит изменение свойств, составляет 40 мкм. Данная информация может быть использована при отработке технологических процессов производства инструмента в качестве обратной связи при подборе режимов работы лазерных установок локальной термической обработки.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ФГБНУ ТИСНУМ на 2020 год.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Padmanabham G., Bathe R. Laser Materials Processing for Industrial Applications. Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. A – Phys. Sci. Springer India. 2018. V. 88. No. 3. PP. 359–374. <https://doi.org/10.1007/s40010-018-0523-5>.
2. Basu A., Chakraborty J., Shariff S.M., Padmanabham G., Joshi S.V., Sundararajan G., Majumdar J.D. and Manna I. Laser surface hardening of austempered (bainitic) ball bearing steel. Scr. Mater. 2007. V. 56. No. 10. PP. 887–890. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.029>.

3. **Kompanets V.O., Laptev V.B., Pigul'skii S.V., Ryabov E.A., Chekalin S.V., Blank V.D., Denisov V.N., Kravchuk K.S., Kulnitskiy B.A., Perezhigin I.A.** The formation of carbonic and silicon dioxide structured films through the decomposition of molecules on the surface of ionic crystals under the action of IR femtosecond laser radiation. *Laser Phys.* 2016. V. 26. No. 6. P. 066002. <https://doi.org/10.1088/1054-660X/26/6/066002>.
4. **Koplak O., Kravchuk K., Useinov A., Talantsev A., Hehn M., Vallobra P., Mangin S., Morgunov R.** Surface engineering of magnetic and mechanical properties of Ta/Pt/GdFeCo/IrMn/Pt heterostructures by femtosecond laser pulses. *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 493. PP. 470-477. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.024>.
5. **Moradi M., Sharif S., Nasab S.J., Moghadam M.K.** Laser Surface Hardening of AISI 420 Steel; Parametric Evaluation, Statistical Modeling and Optimization. *Optik (Stuttg.)*. 2020. P. 165666. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165666>.
6. **Martínez S., Lamikiz A., Ukar E., Calleja A., Arribiubieta J.A., Lopez de Lacalle L.N.** Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process. *Opt. Lasers Eng.* 2017. V. 90. PP. 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.005>.
7. **Maharjan N., Zhou W., Wu N.** Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surf. Coatings Technol.* 2020. V. 385. P. 125399. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125399>.
8. **Telasang G., Majumdar J.D., Padmanabham G., Manna I.** Structure-property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties. *Mater. Sci. Eng. A.* 2014. V. 599. PP. 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.083>.
9. **Maharjan N., Zhou W., Zhou Y., Guan Y., Wu N.** Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo<sub>4</sub> steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surf. Coatings Technol.* 2019. V. 366. PP. 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.036>.
10. **Telasang G., Majumdar J.D., Padmanabham G., Mann I.** Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel. *Surf. Coatings Technol.* 2015. V. 261. PP. 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.058>.
11. **Dinesh B.P., Buvanashakaran G., Balasubramanian K.R.** Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 2012. V. 36. No. 3. PP. 241-257. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2012-0018>.
12. **Bingxu W., Yuming P., Yu L., Gary C.B., Feng Q., Ming H.** Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9. No. 2. PP. 2037-2043. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.036>.
13. **De A.K., Speer J.G., Matlock D.K., Murdock D.C., Mataya M.C., and Comstock**

the corresponding profiles of hardness and elastic modulus.

The 0 coordinate of the abscissa of the graphs in Fig.5 corresponds to a certain point in the sample array. Increasing the coordinate means approaching the edge of the sample, i.e. to the cutting edge of the punching die. The graph (left) shows that the value of hardness increases from  $5.5 \pm 0.5$  GPa in the depth of the sample to  $9.2 \pm 0.7$  GPa at the edge, in the area of  $40 \pm 5$   $\mu$ m. The increase in hardness is also clearly visible in the size of the imprints in the photograph (Fig.4): the size of the imprints

decreases with a constant loading force. At the same time, the observed decrease in the value of the elastic modulus by 10% is insignificant and may be associated not so much with a change in the properties of the material as with the local inclination of the surface in the region of the sample edge. It is known that such a slope always occurs at the edges during mechanical polishing and sample preparation, and calculation of the elastic modulus by the instrumental indentation method is extremely sensitive to the slope of the loading curve, which, in turn, depends

on the angle between the axis of the indenter and the plane of the sample.

## CONCLUSIONS

In this work, in the automatic indentation mode, a series of measurements of hardness and elastic modulus was carried out in order to construct a profile of the distribution of mechanical properties near the cutting edges of cutting dies. The investigated edges were subjected to surface hardening by mechanical micro-milling (lateral side of the stamp) and by local laser heating (cutting edge).



- Jr. R.J. Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2006. V. 37. No. 6. PP. 1875–1886. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0130-y>.
14. **Schubnell J., Pontner P., Wimpory R.C., Farajian M., Schulze V.** The influence of work hardening and residual stresses on the fatigue behavior of high frequency mechanical impact treated surface layers. *Int. J. Fatigue.* 2020. V. 134. P. 105450. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105450>.
  15. **Schulze V., Bleicher F., Groche P., Guo Y.B., Pyun Y.S.** Surface modification by machine hammer peening and burnishing. *CIRP Ann. – Manuf. Technol.* 2016. V. 65. No. 2. PP. 809–832. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.005>.
  16. **Skazochkin A.V., Useinov A.S., Kislov S.V.** Surface hardening of titanium alloy by minerals. *Letters on Materials.* 2018. V. 8. I. 1. 81–87. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-1-81-87>.
  17. **Гладких Е.В., Кравчук К.С., Усеинов А.С., Никитин А.А., Рогожкин С.В.** Исследование влияния облучения ионами на механические свойства стали Eurofer 97. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2019. № 1. С. 73–78. <https://doi.org/10.1134/S1027451019010075>.
  18. **Маслеников И.И., Усеинов А.С., Кравчук К.С., Косцова А.А., Решетов В.Н.** Статистический учет влияния шероховатости на значения твердости, измеряемые при помощи метода инструментального инден-
  - тирования. *Физика твердого тела.* 2018. Т. 60. № 11. С. 2219–2223. <https://doi.org/10.1134/S1063783418110203>.
  19. **Шаповалов В.И., Усеинов А.С., Кравчук К.С., Гладких Е.В., Козин А.А., Смирнов В.В.** Кристаллическая структура и механические свойства пленок нитрида титана, синтезированных методом магнетронного распыления с горячей мишенью. *Физика и химия стекла.* 2017. Т. 43. № 5. С. 538–542. <https://doi.org/10.1134/S1087659617050157>.
  20. **Торская Е.В., Мезрин А.М., Морозов А.В., Усеинов А.С., Кравчук К.С., Фролов Н.Н.** Сравнительное исследование трибологических свойств тонких покрытий на базе оксидов металлов на разных масштабных уровнях. *Трение и износ.* 2015. Т. 36. № 6. С. 699–705. <https://doi.org/10.3103/S1068366615060161>.
  21. ГОСТ Р 8748-2011 (ИСО 14577-1:2002) *Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании.*
  22. **Усеинов А., Кравчук К., Русаков А., Маслеников И., Красногоров И.** Методы автоматизации измерений механических свойств в нанотвердомерах семейства "НаноСкан". *НАНОИНДУСТРИЯ.* 2016. № 7. С. 72–78. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2016.69.7.72.78>.
  23. **Кравчук К., Усеинов А., Маслеников И., Перфилов С.** Автоматизированный контроль параметров композитных изделий с помощью нанотвердомера "НаноСкан". *Наноиндустрия.* 2016. № 3. С. 54–58. DOI: 10.22184/1993-8578.2016.65.3.54.58.

It is shown that automated mapping of the marginal area makes it possible to identify local changes in the mechanical properties of the near-surface layer (hardness and elastic modulus) with a spatial resolution of about 3–5  $\mu\text{m}$ . Spatial resolution depends on the selected indentation load and, accordingly, the distance between adjacent measurements, taking into account the criterion at which adjacent measurements do not influence each other. It is shown that it is possible to increase the spatial resolution by measuring several series of

punctures, displaced relative to the neighboring ones by a distance less than the distance between the punctures.

The obtained dependences of hardness on the distance to the cutting edge make it possible to determine the depth of the near-surface layer which properties were modified as a result of processing. In particular, this work shows that micromilling of the die walls with a cutter does not lead to its hardening, while local laser heating significantly increases the edge hardness compared to hardness in the bulk of the material

(from  $5.5 \pm 0.5$  GPa to  $9, 2 \pm 0.7$  GPa). In this case, according to the obtained hardness profiles, it can be determined that the near-surface layer thickness wherein the properties change equals 40  $\mu\text{m}$ . This information can be used in the development of technological processes for production of tools as a feedback for selection of the operating modes of laser installations for local heat treatment. ■

*The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNCM for 2020.*