

УДК 620.171.2:669.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ВК6, ВК8 И Т5К10, ПРОШЕДШИХ ОБЪЕМНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ

© И. А. Пинахин, В. А. Черниговский, А. А. Брацихин,
М. А. Ягмуров, Х. Р. Сугаров¹

Статья поступила 22 апреля 2016 г.

Приведены результаты исследования механических свойств (микротвердости, прочности на изгиб, абразивной износостойкости) образцов твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, прошедших объемное импульсное лазерное упрочнение (ОИЛУ). Показано, что выбор оптимальных режимов упрочнения (энергии и длительности лазерного импульса, диаметра луча лазера, расстояния от места облучения до главной режущей кромки) может осуществляться с помощью рентгеноструктурного анализа. В этом случае значительно снижаются расходы материалов, времени и средств, необходимые для лабораторных испытаний. При сравнительной обработке полученных результатов и оценке их достоверности использованы методы математической статистики.

Ключевые слова: прочность; износостойкость; упрочнение; твердые сплавы; лазер; рентгеноструктурный анализ; стойкость режущих инструментов.

Как известно, для увеличения эксплуатационного ресурса режущих инструментов и деталей машин используют различные методы упрочнения. Изобретение в XX веке источников высококонцентрированных потоков энергии (лазеров, плазмотронов и др.) привело к созданию новых и, как считается, перспективных электрофизических методов упрочнения, к которым относятся ионно-плазменные, магнитно-импульсные, радиационные, наплавка, плазма газовых разрядов, электроискровые, лазерные и др. При этом существенный недостаток применения методов — недостаточные, а в отдельных случаях практически отсутствующие исследования влияния тех или иных источников высококонцентрированных потоков энергии на свойства инструментальных и конструкционных материалов [1]. Кроме того, в ряде случаев могут формироваться так называемые экстремальные условия рабочей среды (высокое давление, напряженно-деформированное состояние материала, большие деформации и скорости деформаций, состояние вещества, характеризующееся высокой концентрацией энергии, и др.), что зачастую приводит к непредвиденным результатам изменения механических свойств материалов, в частности, к деструкции за счет подвода к упрочняемому объекту избыточной энергии или, наоборот, к незначительному эффекту упрочнения при подаче недостаточной энергии. Так, при использовании метода объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) [2, 3] экстремальные условия выражаются в быстром (до 0,1 с) перераспределении большой по значениям энергии лазерного импульса (до

200 кДж, или плотности энергии до 50 ГДж/м²) сначала в тепловую энергию нагрева материала, а затем — в механическую энергию ударной волны, за счет которой происходят качественные преобразования в материале упрочняемого образца, приводящие к изменению его механических свойств (рис. 1).

Цель работы — исследование механических свойств широко применяемых при изготовлении режущих инструментов твердых сплавов ВК6, ВК8 и Т5К10 с помощью традиционных методов [4, 6] и сравнение полученных данных с результатами рентгеноструктурного анализа.

Размеры исследованных образцов сплавов составляли 50 × 15 × 15 (исследование микротвердости и абразивной износостойкости) и 100 × 30 × 25 мм (рентгеноструктурный анализ).

Исследование прочности на изгиб проводили согласно ГОСТ 27034–86 (ИСО 4506–79).

Количество образцов для испытаний определяли из условия

$$n = \frac{t_{0,9}^2 \text{var}_T}{\delta_T^2}, \quad (1)$$

где $t_{0,9}$ — критерий Стьюдента, взятый при доверительной вероятности 0,9 и числе степеней свободы 2; var_T — коэффициент вариации исследуемого параметра; δ_T — доверительная ошибка (принято $\delta_T = 0,1$).

Прочность на изгиб исследовали с помощью универсальной однозонной электромеханической испытательной машины LabTest 6.600, оснащенной программным обеспечением с возможностью определения девяти параметров, построения графиков и ста-

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия; e-mail: ipinakhin@list.ru

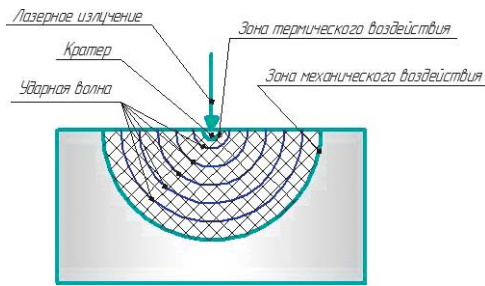


Рис. 1. Схема ОИЛУ материалов

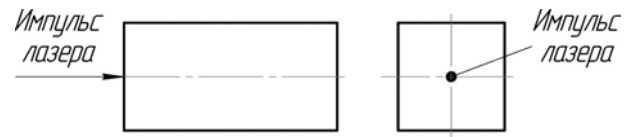


Рис. 2. Схема лазерного облучения образцов

тистической обработки результатов измерений. Микротвердость — с помощью микротвердомера Inpovatest 423D с системой автоматизированного определения параметра, документирования и анализа снимков (шаг — 4 мм).

Испытания на абразивный износ проводили на универсальной машине трения МТУ-01 (схема «пальчиковый образец — вращающийся круг», скорость вращения — 62 м/мин). При этом исходные и упрочненные образцы чередовали. Образцы взвешивали на аналитических весах AND HR-200 (точность — до 0,1 мг).

Для рентгеноструктурного анализа использовали рентгеновский дифрактометр ARL Xtra (излучение $\text{CuK}\alpha$, $l = 1,5406 \text{ \AA}$). Результаты обрабатывали с помощью программы Crystallographica Search Match

Version 3.1.0.2. Для последовательного изучения отдельных зон образцов применяли точечный коллиматор (диаметр точечного пучка — 0,5 мм). При этом исследовали области на поверхности образцов на расстоянии 8 – 32 мм от места облучения до главной режущей кромки (шаг — 4 мм).

ОИЛУ проводили на твердотельном Nd:YAG лазере «ЛИС-200» в одномодовом режиме свободной генерации при следующих режимах: энергия в луче лазера — 50 – 200 Дж (плотность энергии — 2,5 – 50 ГДж/м²), длительность лазерного импульса — 0,5 – 4,0 мс, диаметр луча лазера — 1,0 – 2,5 мм. Схема лазерного облучения представлена на рис. 2.

Вначале исследовали неупрочненные (исходные) образцы, которые затем подвергали ОИЛУ.

Сплавы ВК6, ВК8, Т5К10 подвергали также производственным испытаниям (режущий инструмент — проходной резец с напайной пластиной; обрабатываемый материал — серый чугун СЧ 15; обрабатываемая поверхность — литейная корка; скорость резания —

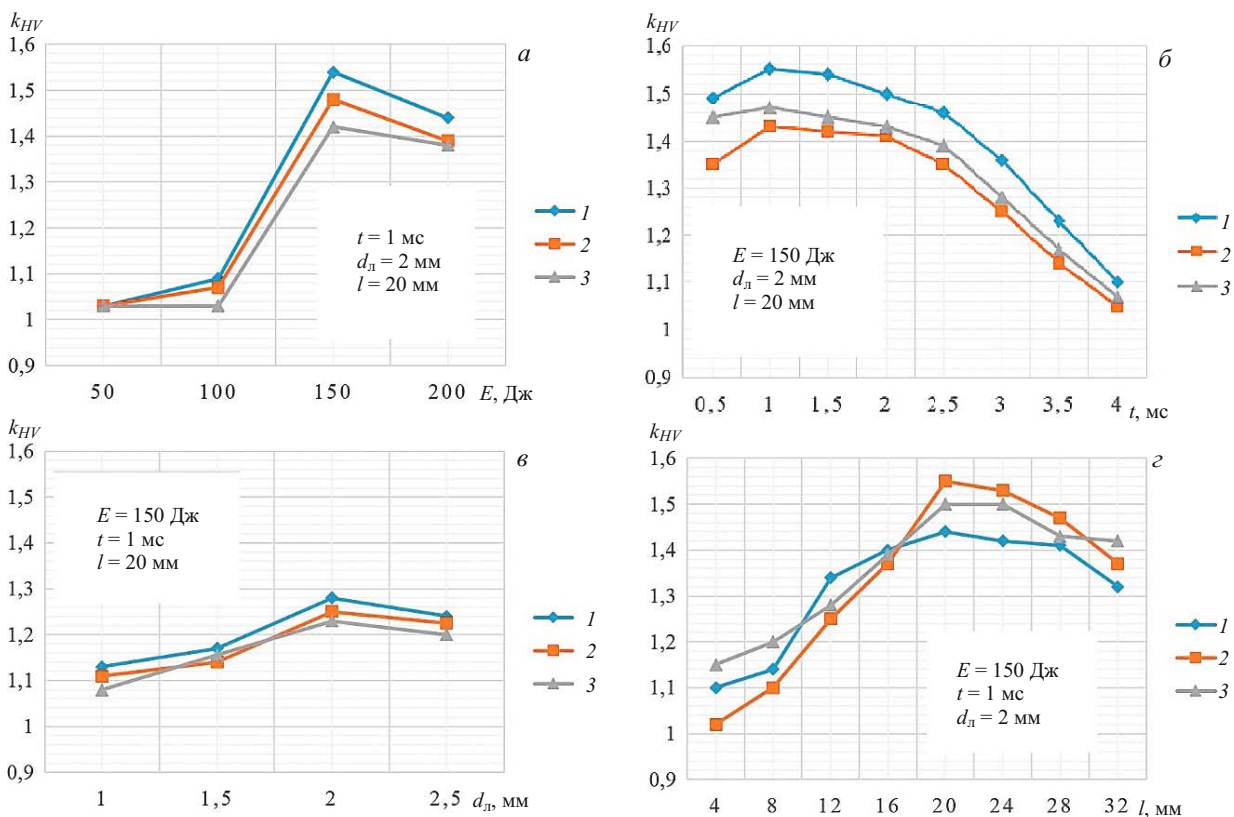


Рис. 3. Зависимость изменения микротвердости твердых сплавов от режима ОИЛУ: а — от энергии лазерного импульса E ; б — длительности лазерного импульса t ; в — диаметра луча лазера d_n ; г — расстояния от места облучения до исследуемой точки образца l (1 — ВК6; 2 — ВК8; 3 — Т5К10)

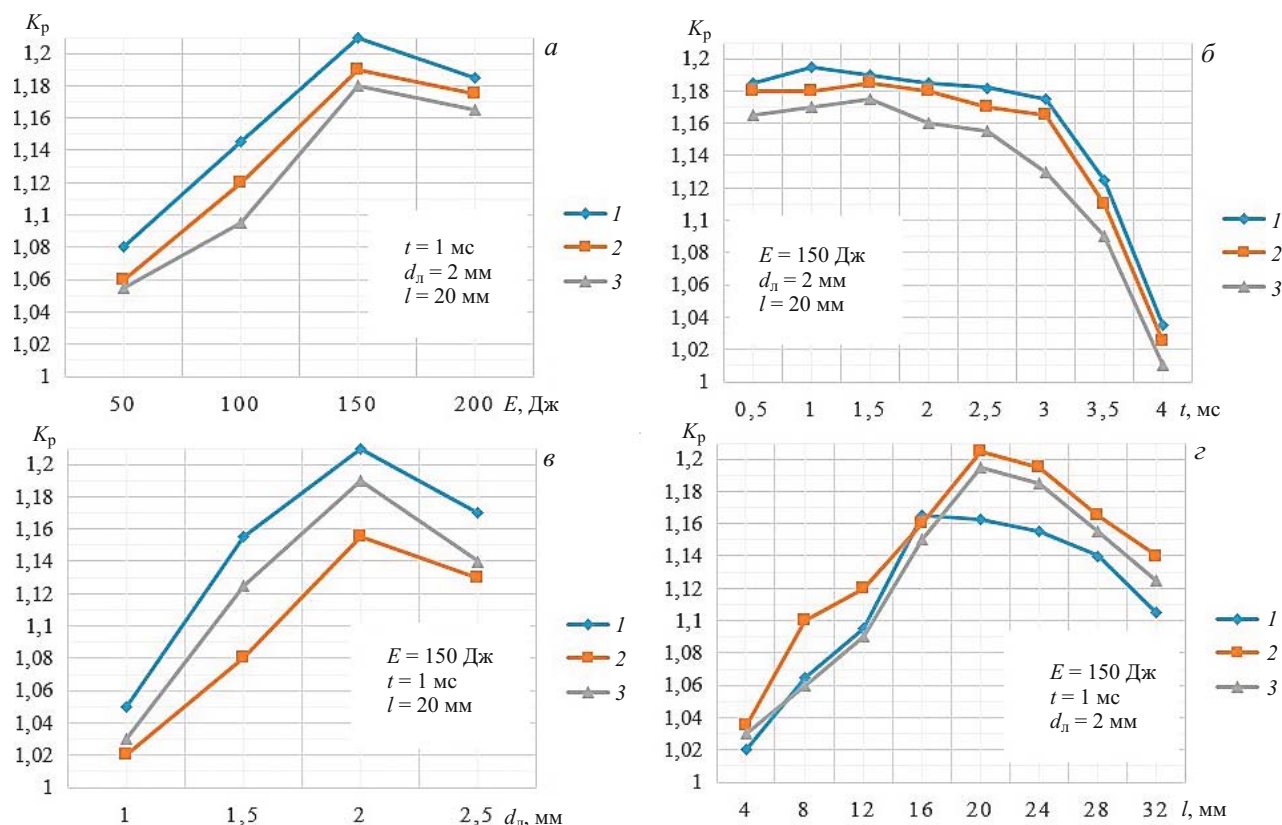


Рис. 4. Зависимость изменения плотности дислокаций K_p твердых сплавов от режима ОИЛУ: а — от энергии лазерного импульса E ; б — длительности лазерного импульса t ; в — диаметра луча лазера $d_{\text{л}}$; г — расстояния от места облучения до исследуемой точки образца l (l — VK6; 2 — VK8; 3 — T5K10)

86 м/мин; подача — 0,52 мм/об; глубина резания — 1,0 мм).

Результаты измерений изменения механических свойств (микротвердости HV , прочности на изгиб $\sigma_{\text{и}}$, абразивной износостойкости δ) сплавов в зависимости от режима ОИЛУ представлены на рис. 3 и в таблице. Для наглядности показаны усредненные (количество образцов для испытаний составляло пять) относительные данные:

$$k_a = a_{\text{ОИЛУ}}/a_{\text{исх}}, \quad (2)$$

где $a_{\text{исх}}$ и $a_{\text{ОИЛУ}}$ — результаты измерений исследуемого механического свойства исходных и прошедших ОИЛУ образцов.

Видно, что зависимости характеризуются ярко выраженными экстремумами, по которым определили оптимальный режим ОИЛУ: $E = 150$ Дж, $t = 1,0$ мс, $d_{\text{л}} = 2,0$ мм, $l = 20$ мм.

Используя полученные результаты рентгеноструктурного анализа исходных и упрочненных образцов, определяли показатели изменения дефектности структуры [7].

Размеры блоков мозаики L и микроискажения кристаллической решетки $\Delta d/d$ вычисляли по формулам:

$$L = \frac{\lambda}{B \cos \theta}, \quad (3)$$

Результаты определения прочности на изгиб $k_{\text{си}}$ и абразивной износостойкости k_{δ} образцов сплавов

Режим ОИЛУ	VK6		VK8		T5K10	
	$k_{\text{си}}$	k_{δ}	$k_{\text{си}}$	k_{δ}	$k_{\text{си}}$	k_{δ}
E , Дж						
50	1,06	1,04	1,05	1,02	1,10	1,08
100	1,24	1,35	1,28	1,34	1,28	1,26
150	1,66	1,59	1,58	1,62	1,68	1,67
200	1,54	1,42	1,51	1,48	1,56	1,54
t , мс						
0,5	1,34	1,32	1,36	1,35	1,38	1,36
1,0	1,52	1,53	1,49	1,50	1,56	1,52
1,5	1,51	1,49	1,49	1,49	1,54	1,51
2,0	1,48	1,46	1,46	1,46	1,49	1,47
2,5	1,36	1,37	1,38	1,38	1,37	1,38
3,0	1,32	1,34	1,33	1,34	1,34	1,34
3,5	1,24	1,28	1,27	1,28	1,28	1,26
4,0	1,16	1,20	1,19	1,18	1,22	1,19
$d_{\text{л}}$, мм						
1,0	1,04	1,03	1,06	1,04	1,08	1,07
1,5	1,18	1,16	1,21	1,16	1,20	1,19
2,0	1,26	1,24	1,28	1,25	1,28	1,24
2,5	1,24	1,21	1,25	1,22	1,25	1,21
l , мм						
4	1,04	1,05	1,06	1,05	1,08	1,07
8	1,12	1,10	1,14	1,12	1,15	1,13
12	1,24	1,22	1,25	1,22	1,26	1,24
16	1,38	1,36	1,41	1,36	1,41	1,39
20	1,52	1,51	1,54	1,50	1,56	1,54
24	1,48	1,46	1,50	1,44	1,49	1,47
28	1,44	1,42	1,46	1,42	1,46	1,44
32	1,35	1,34	1,38	1,31	1,39	1,36

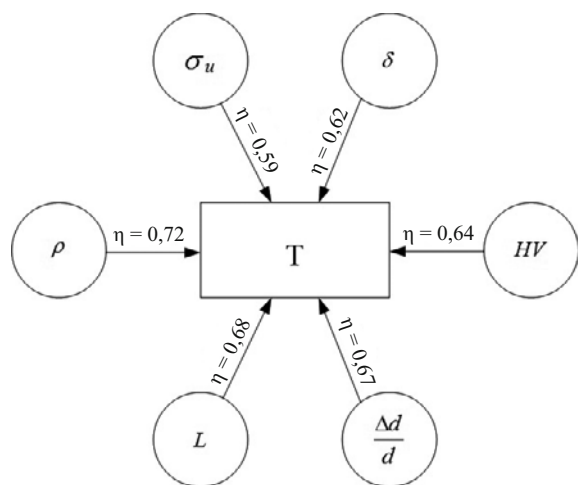


Рис. 5. «Теснота» связи (η) между стойкостью режущего инструмента в производственных условиях (T) и данными лабораторных экспериментов

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{B}{4\lambda \theta}, \quad (4)$$

где λ — длина волны зондирующего рентгеновского излучения; B и θ — физическое уширение и положение центра тяжести рентгеновских дифракционных линий.

Плотность дислокаций рассчитывали по формуле:

$$\rho = \sqrt{\rho_s \rho_L}, \quad (5)$$

где $\rho_s = \frac{90}{b^2} \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2$ и $\rho_L = \frac{3}{L^2}$ — плотности дислокаций,

вычисленные по значениям микроискажений кристаллической решетки и размеру блоков мозаики; b — вектор Бюргерса ($b = 0,301$ нм).

Зависимости изменения плотности дислокаций от режима ОИЛУ приведены на рис. 4 (зависимости L и $\Delta d/d$ аналогичны).

Видно, что экстремумы совпадают с установленными оптимальными режимами ОИЛУ (см. рис. 3, таблицу).

Для окончательной оценки возможности замещения механических испытаний рентгеноструктурным анализом провели производственные испытания образцов. «Тесноту» связи (рис. 5) между результатами лабораторных экспериментов и производственных испытаний (стойкость режущего инструмента) определяли по корреляционному отношению

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma^2 - \sigma_y^2}{\sigma^2}}, \quad (6)$$

где $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (y - \bar{y})^2$, $\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum (\bar{y}_j - \bar{y})^2$; \bar{y}_j — групповая средняя.

Таким образом, проведенные исследования твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10 показали возможность применения рентгеноструктурного анализа для оптимизации режимов ОИЛУ вместо механических испытаний, что позволит уменьшить затраты на изготовление образцов, расход электроэнергии и время лабораторных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Н. Л., Гаврилюк В. С., Жилкин А. М. Технологические лазеры и их применение в машиностроении. Принципы лазерного излучения / Технология металлов. 2000. № 1. С. 39 – 45.
2. Pinahin I. A., Chernigovskij V. A., Bracihin A. A., Yagmurov M. A. Improvement of Wear Resistance of VK6, VK8, T5K10, and T15K6 Hard Alloys by Volume Pulsed Laser Hardening / J. Friction Wear. 2015. Vol. 36. N 4. P. 330 – 333.
3. Пинахин И. А., Копченков В. Г. Влияние импульсной лазерной обработки твердосплавных режущих инструментов на эффективность обработки металлов резанием / Вестник ДГТУ. 2010. № 8. С. 1235 – 1240.
4. Яковлева С. П., Махарова С. Н., Борисова М. З. Комплексное исследование механических свойств низколегированной стали с ультрамелкозернистой (200 – 600 нм) структурой / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 1. С. 50 – 53.
5. Мокрицкий Б. Я. Метод оценки свойств инструментальных материалов и диагностика работоспособности режущего инструмента / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 9. С. 41 – 43.
6. Гаденин М. М. Характеристики механических свойств материалов при анализе условий достижения предельных состояний / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 58 – 63.
7. Ярьско С. И. Повышение эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента при лазерной обработке / Физика и химия обработки материалов. 2003. № 5. С. 18 – 22.

REFERENCES

1. Ivanov N. L., Gavriilyuk V. S., Zhilkin A. M. Tekhnologicheskie lazery i ikh primeneniye v mashinostroyeni. Printsipy lazernogo izlucheniya [Technological lasers and their appliance in mechanical engineering. Fundamentals of laser irradiation] / Tekhnol. Metallov. 2000. N 1. P. 39 – 45 [in Russian].
2. Pinahin I. A., Chernigovskij V. A., Bracihin A. A., Yagmurov M. A. Improvement of Wear Resistance of VK6, VK8, T5K10, and T15K6 Hard Alloys by Volume Pulsed Laser Hardening / J. Friction Wear. 2015. Vol. 36. N 4. P. 330 – 333.
3. Pinakhin I. A., Kopchenkov V. G. Vliyaniye impul'snoi lazernoï obrabotki tverdosplavnykh rezhushchikh instrumentov na éffektivnost' obrabotki metallov rezaniem [Impact of pulse laser treatment of hard alloy cutting tools on efficiency of metal cutting] / Vestn. DGTU. 2010. N 8. P. 1235 – 1240 [in Russian].
4. Yakovleva S. P., Makharova S. N., Borisova M. Z. Kompleksnoe issledovanie mekhanicheskikh svoystv nizkolegirovannoi stali s ul'tramelkozernistoi (200 – 600 nm) strukturoï [Complex study of the mechanical properties of low-alloyed steel with ultra-fine-grained (200 – 600 nm) structure] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 1. P. 50 – 53 [in Russian].
5. Mokritskii B. Ya. Metod otsenki svoystv instrumental'nykh materialov i diagnostika rabotosposobnosti rezhushchego instrumenta [Assessment of the properties of tool materials and diagnostic of the Efficiency of cutting tools] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 9. P. 41 – 43 [in Russian].
6. Gadenin M. M. Kharakteristiki mekhanicheskikh svoystv materialov pri analize uslovii dostizheniya predel'nykh sostoyanii [Characteristics of the mechanical properties of materials in analysis of achieving limiting state conditions] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 2. P. 58 – 63 [in Russian].
7. Yares'ko S. I. Povysheniye éksploatatsionnykh kharakteristik tverdosplavnogo instrumenta pri lazernoï obrabotke [Improving of mechanical properties of hard alloy tools under laser treatment] / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2003. N 5. P. 18 – 22 [in Russian].