

Условия эффективного применения режущего инструмента, упрочненного лазерным импульсным излучением

Яресько С.И.

Самарский филиал ФИАН, Самарский государственный технический университет
г. Самара, Российская Федерация

scisec@fian.smr.ru

Аннотация. Комплексное исследование влияния режимов лазерной обработки и резания на стойкость упрочненного инструмента свидетельствует о наличии области эффективного использования лазерной обработки. В частности, при фиксированной энергии облучения рост стойкости наблюдается только для определенных значений глубины резания. По данным диюметрических исследований определены причины обнаруженного явления. Измерения микротвердости проведены по вспомогательной задней поверхности проходных токарных резцов (сталь Р18) после точения конструкционной стали 12Х2Н4А при различных режимах резания для инструмента в исходном состоянии и после лазерного упрочнения. Установлена взаимосвязь изнашивания упрочненного инструмента с режимами резания и лазерной обработки. Выполненные измерения деформационных характеристик в зоне контакта после завершения процесса точения позволили установить, что протекание процессов разупрочнения материала инструмента, наблюдаемое при точении с высокими значениями подачи, ограничивает область режимов резания упрочненным инструментом.

Ключевые слова: упрочняющая технология, лазерная обработка, режущий инструмент, микротвердость, разупрочнение, отпусковые явления.

ВВЕДЕНИЕ

Использование методологии многофакторного эксперимента для оценки совместного влияния факторов, определяющих стойкость инструмента после лазерного упрочнения, позволило установить сложный и взаимообусловленный характер влияния режимов резания и облучения на стойкость упрочненного инструмента [1]. В частности, результаты моделирования процесса резания упрочненным инструментом показали, что на стойкость инструмента существенное влияние оказывают не только линейные эффекты, характеризующие процессы резания и упрочнения, но и нелинейные эффекты их взаимодействия. Эти эффекты по величине соизмеримы с линейными и определяют неаддитивный вклад в изменение стойкости инструмента режимов резания и упрочнения. Показано, что для достижения наибольшего положительного эффекта при упрочнении необходимо лазерную обработку (ЛО) осуществлять с учетом конкретных режимов эксплуатации инструмента.

Анализ математической модели, описывающей функциональную связь стойкости упрочненного инструмента с режимами резания и упрочнения, позволил разработать рекомендации по рациональному применению упрочненного инструмента [2].

Вместе с тем комплексные исследования влияния режимов ЛО и резания на стойкость упрочненного инструмента, включающие анализ кривых равной стойкости, построенных в результате приведения математической модели к каноническому базису [2], свидетельствуют о наличии области эффективного использования ЛО. В частности, при фиксированной энергии облучения рост стойкости наблюдается только для определенных значений глубины резания (для данной пары инструмент – деталь), что совпадает с выводами, основанными на непосредственном анализе модели стойкости [3]. В настоящей работе в рамках модели, развитой в [2], рассматриваются ограничения, накладываемые на условия эксплуатации инструмента, и анализируются условия и причины их возникновения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения причины обнаруженного явления проведены исследования микроструктуры в контактной зоне и измерения микротвердости на шлифе (рис. 1), изготовленном по вспомогательной задней поверхности модельных резцов (сталь Р18), износ которых достиг регламентной величины 0,4 мм. Проведенные измерения свидетельствуют о наличии процесса разупрочнения инструментального материала при резании с большими глубинами. Общий вид режущего лезвия резцов после точения стали 12Х2Н4А представлен на рис. 2. Данные по измерению микротвердости вдоль вспомогательной режущей кромки (направление 2 на рис. 1 и 2) приведены ниже на рис. 5, а и 5, б. Аналогичные данные, полученные вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних поверхностей резца (направление 1 на рис. 1 и 2) представлены также ниже на рис. 6, а и 6, б. Измерения были выполнены для упрочненных и неупрочненных резцов, испытанных при скорости резания $V = 42,5$ м/мин и подаче $s = 0,2$ мм/об при различных значениях глубины резания (t).

ЛО резцов осуществлялась на установке, собранной на основе твердотельного импульсного лазера с активным элементом из стекла с Nd, обеспечивающей энергию в импульсе до 70 Дж при неравномерности распределения плотности энергии лазерного излучения на участке $4,5 \times 4,5$ мм не хуже $\pm 5\%$. Лазерная обработка модельных резцов (передний угол $\gamma = 8^\circ$, задний угол $\alpha = 8^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 45^\circ$, радиус при вершине резца $r = 0,8$ мм) из быстрорежущей

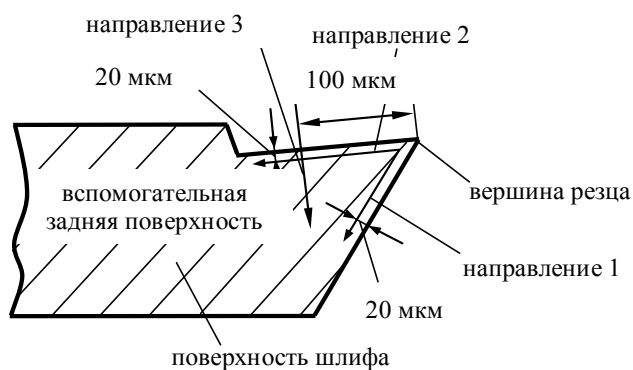
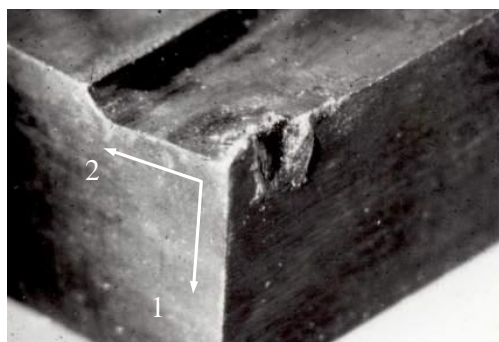
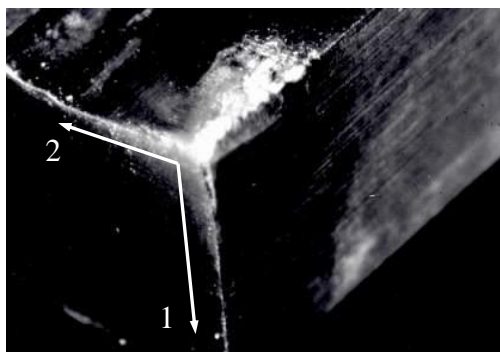


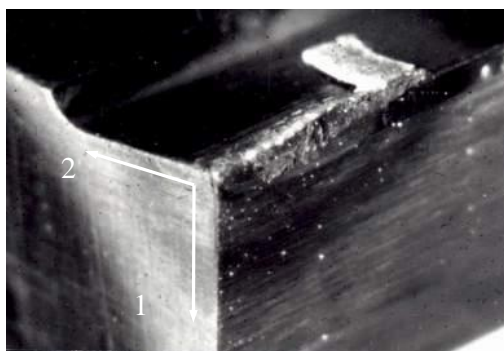
Рис. 1. Схема измерения микротвердости на шлифе резца



а



б



в

Рис. 2. Общий вид режущего лезвия резцов после завершения процесса точения, $\times 12,5$:

а – необлученный резец, $t = 1,5$ мм, время точения 43 мин;
 б – образец после ЛО, $t = 1,5$ мм, время точения 165,4 мин;
 в – образец после ЛО, $t = 2,34$ мм, время точения 3,4 мин

стали Р18 после стандартной термообработки (ТО) проводилась согласно рекомендациям [1] однократно по передней поверхности на воздухе. Плотность энергии излучения $2,3 \text{ Дж/мм}^2$. В этом случае в зоне лазерного воздействия на обрабатываемой поверхности инструмента обеспечивалась температура, близкая к температуре ликвидуса стали Р18.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура исходного материала после стандартной ТО представлена на рис. 3. Отчетливо выявляется мартенситная структура, на фоне мартенситных игл расположены крупные избыточные карбиды, по данным [4] основным карбидом стали Р18 после отпуска является карбид вида M_6C , заметно небольшое количество мелких вторичных карбидов. Микротвердость материала основы – $\sim 680 \dots 690 \text{ кг/мм}^2$ ($6,67 \dots 6,77 \text{ ГПа}$).

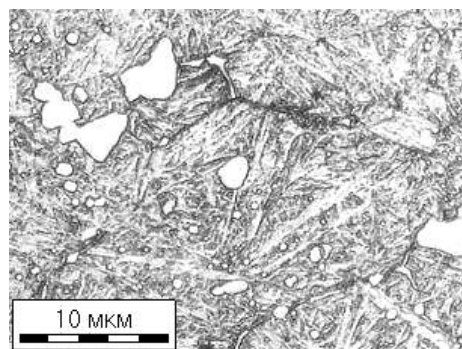
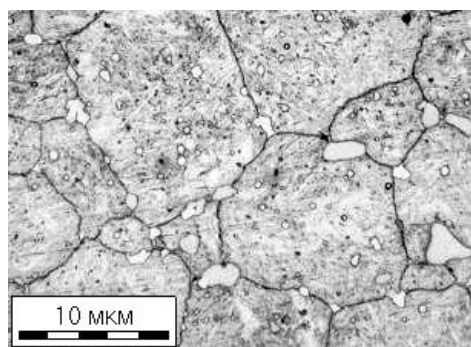


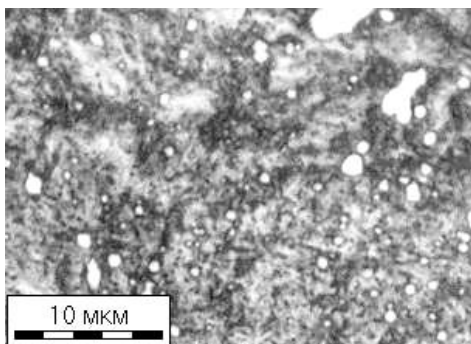
Рис. 3. Структура исходного материала (сталь Р18 после стандартной термообработки)

Независимо от режима резания и условий облучения у границы со вспомогательной режущей поверхностью в зоне у вершины резца (рис. 4, а) вследствие процессов вторичной закалки и наклепа материала после точения наблюдается слаботравящийся мартенсит, небольшое количество первичных карбидов, расположенных по границам аустенитных зерен и мелкодисперсные вторичные карбиды. Структура наиболее хорошо выявляется стандартными металлографическими методами для инструмента, имеющего наименьшее время достижения регламентного износа ($T = 3,4$ мин при $t = 2,34$ мм), что, скорее всего, обусловлено более низким наклепом приповерхностного слоя при резании.

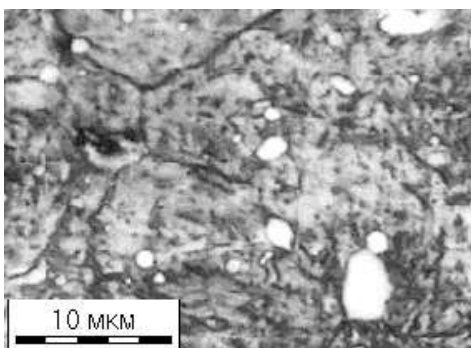
Анализ результатов измерений показывает, что на расстоянии 20 мкм от поверхности распределение микротвердости по указанным направлениям (рис. 1) с высокой степенью достоверности отображает экспериментальные данные (коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0,71 \dots 0,94$; рис. 5, а, рис. 6, а). Следовательно, на глубинах, не превышающих 20 мкм, температурное поле распределено в зоне трения достаточно равномерно, что в свою очередь приводит к образованию гомогенной структуры в приповерхностной области как в зоне контакта стружки с передней поверхностью резца, так и в зоне контакта “инструмент-деталь”. Причем отпускные явления наиболее ярко выражены для необлученного инструмента (рис. 5, а, кривая 3). Сравнение структуры участков приповерхностного слоя, расположенных в области наибольшего снижения микротвердости, для инструмента, испытанного



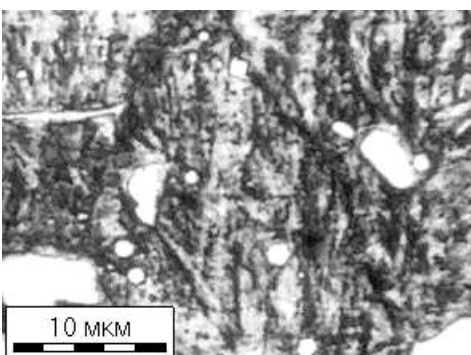
a



б



в



г

Рис. 4. Структура приповерхностного участка на вспомогательной задней поверхности:

a – вблизи вершины реза; *б, в, г* – в зоне наибольшего снижения микротвердости; *б* – необлученный резец; *в, г* – облученный инструмент; *б, в* – $t = 1,5$ мм; *г* – $t = 2,34$ мм; расстояние от линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних режущих поверхностей реза: *б, в* – $L \cong 250$ мкм; *г* – $L \cong 200$ мкм

при различных условиях резания, показывает их существенные отличия, выражающиеся в разной степени травмируемости анализируемых участков, следовательно, и в разной степени интенсивности отпускных процессов, протекающих при эксплуатации инструмента. Так для резцов без ЛО характерны более интенсивный распад мартенсита, проявляющийся в исчезновении характерной игольчатой структуры и коагуляции вторичных карбидов (рис. 4, *б*). При эксплуатации инструмента после ЛО при $t = 2,34$ мм на фоне сохранившейся игольчатой мартенситной структуры наблюдается выделение вторичной карбидной фазы (рис. 4, *г*). После резания с $t = 1,5$ мм указанные выше процессы выражены в меньшей степени, вторичная фаза более дисперсна, коагуляция вторичных карбидов менее выражена (рис. 4, *в*), чем для необлученного инструмента. В этом случае ЛО приводит к затягиванию отпускных процессов в зоне контакта, распад мартенситной фазы не завершен, что является предпосылкой наблюдаемого повышения эксплуатационных характеристик упрочненного инструмента при данном режиме резания.

Для контрольного инструмента (без ЛО) снижение микротвердости (расстояние от поверхности ~ 20 мкм) достигает максимальной величины на расстоянии ~ 300 мкм от вершины лезвия и составляет $\sim 70\%$ ($\sim 4,72$ ГПа) от микротвердости основного металла ($\sim 6,75$ ГПа) и сохраняется на протяжении $\sim 0,8$ мм (рис. 5, *a*). После ЛО и точения с глубинами резания $t = 1,5$ мм и $t = 2,34$ мм снижение микротвердости менее значительно (кривые 1 и 2 на рис. 5, *a*) и носит явно сосредоточенный характер, что особенно заметно при точении с $t = 2,34$ мм. Причем в этом случае наибольший провал твердости наблюдается вблизи режущей кромки, где контактные напряжения на передней поверхности инструмента принимают наибольшие значения. Сопоставляя полученные данные с эпюрами контактных давлений по передней поверхности режущего инструмента (РИ), приведенными в [5], можно видеть, что кривые распределения микротвердости вдоль вспомогательной режущей кромки практически повторяют распределение контактных давлений. Отсюда следует, что с точки зрения уменьшения термодинамической напряженности в зоне контакта инструмент-деталь наиболее благоприятной является ЛО для инструмента, работавшего при глубине резания 1,5 мм. При увеличении величины t уменьшается площадь контакта стружки с резцом и длина пластического контакта (рис. 7, *a, б*), возрастает величина контактных давлений у передней режущей кромки, что приводит к уменьшению прочности материала инструмента и его преждевременному износу. При удалении от передней поверхности (расстояние ~ 50 мкм) разупрочнение материала реза менее выражено для инструмента после лазерного упрочнения, отработавшего при $t = 1,5$ мм, и микротвердость составляет не менее 85% от микротвердости исходного материала, в то время как для неупрочненного реза выравнивание свойств материала практически отсутствует (рис. 5, *б*). При проведении измерений микротвердости на глубине ~ 50 мкм по направлениям 1 и 2 (рис. 1) как уже отмечалось, отпускные явления затронули материал инструмента, не прошедшего ЛО, в гораздо большей степени. На расстоянии от вершины лезвия $\sim (1,0 \dots 1,2)$ мм микротвердость остается достаточно низкой ($\sim 4,14$ ГПа), что соответствует ее снижению на $\sim 40\%$ относительно микро-

твердости основного материала (кривая 3, рис. 5, б). Анализ приведенных графиков показывает, что независимо от режима точения для резцов после ЛО падение микротвердости менее значительно, что связано с более низкими значениями температуры в зоне контакта при резании, чем для необлученного инструмента. Однако в этом случае разброс значений микротвердости более существенен, чем в случае отсутствия ЛО ($R^2 \approx 0,42 \dots 0,46$ для инструмента после ЛО и $R^2 \approx 0,75 \dots 0,78$ для инструмента без ЛО). Снижение отпускных явлений в зоне контакта при резании после ЛО, очевидно, как и в [6] можно связать с экранирующим действием упрочненного слоя, связанным с изменением локализации температурного поля в зоне фрикционного контакта.

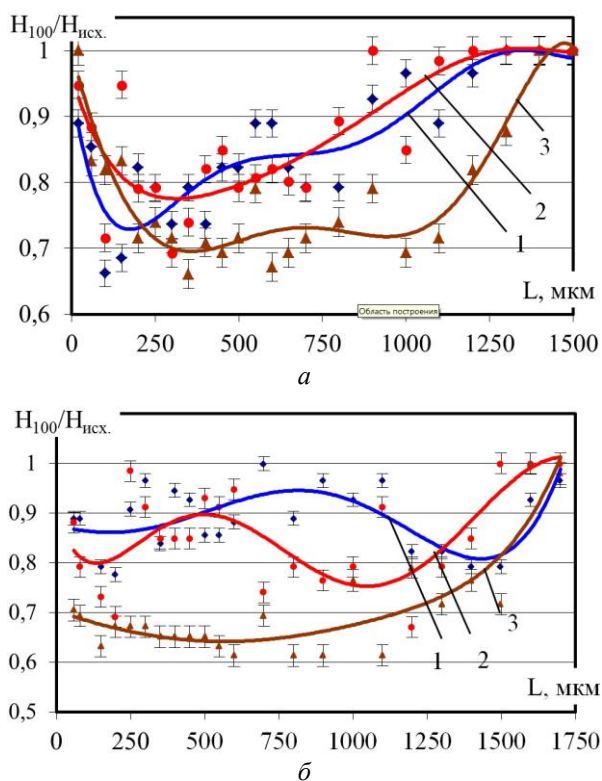


Рис. 5. Распределение микротвердости вдоль вспомогательной режущей кромки на расстоянии ~ 20 мкм (а) и ~ 50 мкм (б) от поверхности после: 1 – ЛО ($t = 2,34$ мм); 2 – ЛО ($t = 1,5$ мм); 3 – без ЛО ($t = 1,5$ мм)

Измерения микротвердости, проведенные вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних поверхностей изношенного инструмента (направление 1 на рис. 1), показывают, что и в этом случае процесс разупрочнения наиболее ярко выражен для инструмента после точения с $t = 2,34$ мм (кривая 1 на рис. 6, а). Причем на большей глубине на этом же режиме точения степень разупрочнения сравнима с состоянием неупрочненного инструмента и особенно велика она у режущей кромки (рис. 6, б). Здесь в данном случае локализован износ, и контактные давления превосходят значения, характерные для неупрочненных резцов. Вследствие этого наступает катастрофический износ инструмента и его стойкость весьма незначительна ($T = 3,4$ мин против $T = 165,4$ мин для упрочненного резца, работавшего при $t = 1,5$ мм). После ЛО микротвердость приповерхностного

слоя материала в зоне контакта сохраняет свои первоначальные значения, начиная с глубин $\sim (80 \dots 140)$ мкм, для необлученного инструмента структура отпуска с низкими значениями микротвердости наблюдается вплоть до глубин $\sim (0,5 \dots 0,6)$ мм (рис. 8). В силу этого стойкость необлученного инструмента почти в 4 раза ниже стойкости упрочненного инструмента, испытанного при аналогичных условиях нагружения.

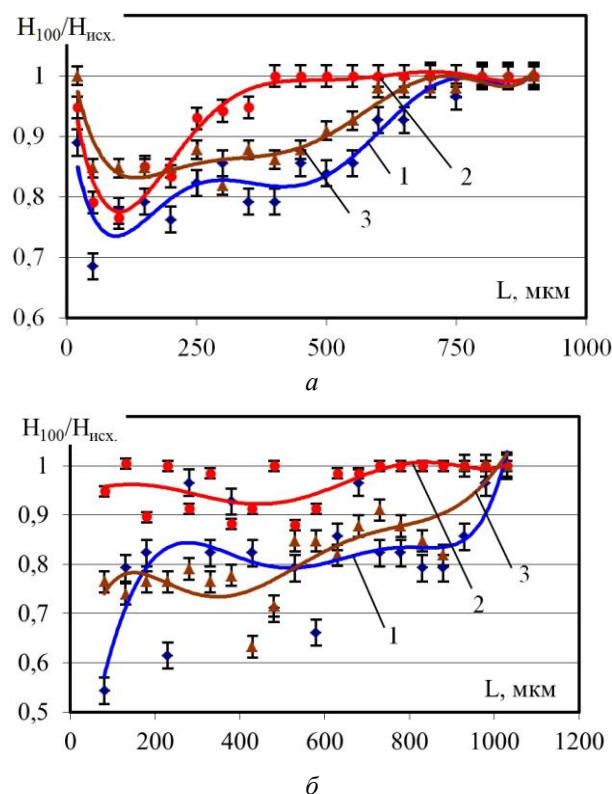
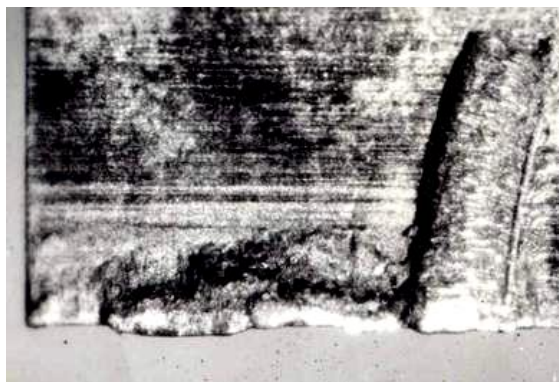


Рис. 6. Распределение микротвердости вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних режущих поверхностей резца, на расстоянии ~ 20 мкм (а) и ~ 50 мкм (б) от поверхности после: 1 – ЛО ($t = 2,34$ мм); 2 – ЛО ($t = 1,5$ мм); 3 – без ЛО ($t = 1,5$ мм)

На основании проведенных исследований имеется возможность сформулировать ряд требований к условиям упрочняющей ЛО инструмента и его эксплуатации. Во-первых, можно выделить группу требований, относящихся к конкретным условиям проведения эксперимента, касающихся, в частности, ограничений на режимы эксплуатации упрочненного инструмента. Во-вторых, группу общих требований к режимам ЛО и эксплуатации инструмента, обеспечивающих увеличение стойкости упрочненного РИ. К ним, прежде всего, следует отнести требования к условиям проведения лазерной обработки, которые можно реализовать при организации технологического процесса лазерной импульсной упрочняющей обработки различных типов металлорежущего инструмента. В качестве таковых при определении области эффективного применения упрочняющей ЛО послужили требования к выбору упрочняемой поверхности РИ и выбору среды, в которой выполняется обработка. Правомочность распространения последних на различные типы РИ подлежит дальнейшей проверке и апробации в производственных условиях.



а



б

Рис. 7. Износ по передней поверхности облученных резцов, $\times 20$: а – $t = 1,5$ мм; б – $2,34$ мм

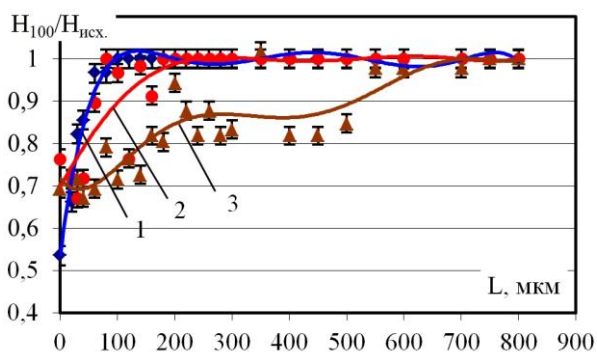


Рис. 8. Распределение микротвердости перпендикулярно вспомогательной режущей кромке резца на расстоянии ~ 100 мкм от вершины резца после: 1 – ЛО ($t = 2,34$ мм); 2 – ЛО ($t = 1,5$ мм); 3 – без ЛО ($t = 1,5$ мм)

Выполненные измерения деформационных характеристик в зоне контакта после завершения процесса резания свидетельствуют о характерном для исследуемой пары инструментальный – обрабатываемый материал (P18 – 12X2H4A) росте термодинамической напряженности при точении с глубиной резания $t > 1,5$ мм. Это сопровождается соответствующим протеканием процессов разупрочнения материала инструмента, что ограничивает область режимов резания упрочненным инструментом значениями $t \leq 1,5$ мм. Анализ микроструктуры в контактной зоне и данных по измерению микротвердости позволяет констатировать, что ЛО приводит к росту стойкости инструмента, эксплуатируемого при режимах резания, когда рост термодинамической напряженности в зоне резания не приводит

к развитию процессов разупрочнения. Оптимальное сочетание режимов ЛО и режимов резания упрочненным инструментом существенно увеличивает стойкость инструмента. По сравнению с необлученным инструментом стойкость возрастает более чем в 4 раза (при $t = 1,5$ мм). Увеличение подачи до значения $t = 2,34$ мм более чем в 10 раз сокращает стойкость инструмента по сравнению с необлученными резцами.

Выводы

Проведенные исследования процесса резания упрочненным инструментом, анализ микроструктуры в контактной зоне и полученные данные дюриметрических измерений позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Наличие процесса разупрочнения инструментального материала при точении с большими глубинами резания свидетельствует о наличии области эффективного использования упрочняющей лазерной обработки.

2. Для исследуемой пары инструментальный – обрабатываемый материал (P18 – 12X2H4A) область режимов резания ограничена значениями глубины резания, не превышающими 1,5 мм ($V = 42,5$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об). При оптимальном сочетании режимов ЛО и режимов резания упрочненным инструментом его стойкость возрастает более чем в 4 раза по сравнению со стойкостью неупрочненного инструмента.

3. Учитывая сложный и взаимообусловленный характер влияния режимов резания и облучения на стойкость упрочненного инструмента режимы резания упрочненным инструментом следует назначать с учетом условий и режимов лазерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярьско С.И. Физико-технологические особенности процесса резания инструментом, упрочненным лазерным излучением / С.И. Ярьско, М.С. Нерубай // *Металлооб- раб.* – 2001. – №1. – С. 22-27.
2. Нерубай М.С. Моделирование процесса резания инструментом, упрочненным лазерным излучением / М.С. Нерубай, С.И. Ярьско // *Справ. Инженер. журн.* – 2004. – №5. – С. 6-10.
3. Ярьско С.И. Многофакторный подход при анализе упрочняющей обработки режущего инструмента. 3. Модель стойкости режущего инструмента, упрочненного лазерным излучением / С.И. Ярьско, С.В. Каюков, Т.К. Кобелева // *Препр. ФИАН.* – М., ФИАН, 2001. – №23. – 40 с.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
5. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 148 с.
6. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. – Харьков: Вища шк., изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 128 с.

Conditions for the Effective Use of the Cutting Tool, Hardened by a Laser Pulsed Radiation

Yaresko S.I.

Lebedev Physical Institute, Samara State Technical University
Samara, Russian Federation
scisec@fian.smr.ru

Abstract. Complex research of the influence of laser processing regimes and cutting modes on the durability of hardened tool indicates on the field of efficient use of laser treatment. In particular, at the fixed irradiation energy the durability growth is observed only for certain values of the depth of cut. The causes of the observed phenomena were determined according to durometric researches. The measurements of microhardness performed on the end clearance face of the straight turning tool (steel R18) after turning structural steel 12Kh2N4A under various cutting modes for the tool in the initial state and after laser hardening. The interconnection of the wear of hardened tool with the cutting modes and laser treatment regimes was installed. It is shown that the processes of softening of the tool material, that observed when turning with high feed values, limits the scope of cutting conditions hardened tool. The measurement of deformation characteristics in the contact zone after the end of the process of turning allowed to install this.

Keywords: hardening technology, laser processing, cutting tools, microhardness, loss of strength, temper effects.

REFERENCES

1. Yaresko S.I., Nerubay M.S. Physical and technological features of cutting by tools hardened by laser radiation [Fiziko-tehnologicheskie osobennosti rezaniya instrumentom, uprochnennym lazernym izlucheniem], *Metallobrabotka*

[*Metalworking*], 2001, no.1, pp. 22-27. (in Russ.)

2. Nerubay M.S., Yaresko S.I. Modelling of the process of cutting by the hardened tool [Modelirovanie protsessa rezaniya instrumentom, uprochnennym lazernym izlucheniem], *Spravochnik. Inzhnernyy zhurnal [Handbook. an Engineering Journal]*, 2004, no. 5, pp. 6-10. (in Russ.)

3. Yaresko S.I., Kayukov S.V., Kobeleva T.K. Multifactorial approach to analyzing the hardening treatment of the cutting tool. 3. Model of tool life, hardened by laser radiation [Mnogofaktornyy podkhod pri analize uprochnyayushchey obrabotki rezhushchgo instrumenta. 3. Model stoykosti rezhushchego instrumenta, uprochnennogo lazernym izlucheniem], *Preprint FIAN [Pre-print of FIAN]*, 2001, no.23, 40p. (in Russ.)

4. Geller Yu.A. *Instrumentalnye stali* [Tool steels], Moscow, Metallurgy, 1983, 527 p. (in Russ.)

5. Poletika M.F. *Kontaknyye nagruzki na rezhushchikh poverkhnostykh instrumenta* [Contact loads on cutting surfaces of the tool], Moscow, Mechanical engineering, 1969, 148 p. (in Russ.)

6. Matsevityy V.M. *Pokrytiya dlya rezhushchikh instrumentov* [Coatings for Cutting Tools], Kharkiv, Publisher at Kharkov University, 1987, 128 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Ярьсько С.І. Умовля ефективного використання режущего інструмента, упрочненого лазерним імпульсним випромінюванням // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – Т.4, №1. – С. 60-65.

Reference to article

Yaresko S.I. Conditions for the effective use of the cutting tool, hardened by a laser pulsed radiation, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2016, vol.4, no.1, pp. 60-65.