

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ УПРОЧНЕННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2006 С.И. Яресько

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Проведен анализ многофакторной модели, адекватно описывающей функциональную взаимосвязь стойкости упрочненного инструмента с физико-техническими параметрами, характеризующими как режим облучения, так и режим резания. Показано, что наибольший положительный эффект использования облученного инструмента достигается с учетом конкретных режимов его эксплуатации. Разработаны и обоснованы рекомендации по рациональному использованию упрочненного инструмента. Установлено, что результаты производственных испытаний соответствуют рекомендациям, сделанным при анализе модели стойкости упрочненного инструмента.

Введение

Дальнейшее развитие метода лазерного упрочнения металлообрабатывающего инструмента возможно в рамках комплексного подхода к исследованию влияния режимов упрочнения и эксплуатации металлообрабатывающего инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материалов на его стойкость [1]. В основе такого подхода лежит изучение и анализ влияния режимов облучения и резания на стойкость инструмента одним из известных экспериментально-статистических методов. При этом в качестве варьируемых факторов целесообразно назначать величины, описывающие эффективность процесса лазерного воздействия, и величины, определяющие работу инструмента, а в качестве оптимизируемого параметра выбрать его стойкость.

Подход к оценке эффективности процесса лазерной термической обработки (ЛТО), заключающийся в комплексном исследовании влияния всех основных факторов на стойкость упрочненного инструмента и разработка на его основе рекомендаций по рациональному использованию металлорежущего инструмента, должен способствовать повышению качества использования процесса ЛТО в инструментальном производстве и расширению области применения упрочненного лазерным излучением инструмента. Этот подход предполагает рассмотрение процесса ЛТО инструмента в совокупности с

процессом резания. С этих позиций конечный результат применения ЛТО инструмента ранее не рассматривался, и предлагаемый комплексный подход к его анализу предполагает построение модели такого процесса, а не модели процесса трения или процесса ЛТО.

В этом случае для поиска закономерностей, характеризующих влияние тех или иных факторов на стойкость упрочненного инструмента, целесообразно использовать метод активного многофакторного эксперимента, когда все исследуемые факторы изменяются одновременно согласно определенному плану эксперимента [2-4].

Для определения существенного влияния отдельных входных управляемых факторов на выходные параметры технологических систем и установления связи между ними может быть использован регрессионный анализ, позволяющий построить функциональную модель связи, которую можно использовать для управления выходными параметрами системы, являющейся объектом исследования.

Адекватная модель процесса резания упрочненным инструментом и ее анализ

В соответствии с методологией многофакторного эксперимента любой технологический процесс (в частности, процесс резания упрочненным лазерным излучением инструментом) можно рассматривать как пример некой вероятностной системы, когда на-

личие комплекса условий, в котором производятся наблюдения, не влечет за собой неизбежного появления некоторого события, а только определяет вероятность его появления. При всем многообразии металлообрабатывающего инструмента (типоразмеры, материал и т.д.), условий его эксплуатации и возможных способов обработки их рабочих поверхностей решение проблемы технологического обеспечения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств инструмента следует рассматривать в рамках такого методологического подхода, каким является системный поход [5]. Основанная на этом принципе кибернетическая модель процесса резания инструментом, упрочненным импульсным лазерным излучением, была разработана и развита в работах [6-8].

Применительно к точению комплексный подход к анализу процесса эксплуатации упрочненного инструмента был реализован в следующей последовательности:

1. Методом случайного баланса определены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на эксплуатационные характеристики облученного инструмента;

2. Используя регрессионный анализ, найдена адекватная функциональная связь между стойкостью инструмента и режимами упрочнения и эксплуатации;

3. Осуществлено прогнозирование стойкости упрочненных токарных резцов;

4. Дана интерпретация результатов натурного эксперимента, и разработаны рекомендации по использованию упрочненного инструмента;

5. Разработаны модельные представления о роли вторичных структур на процесс изнашивания при лазерной обработке поверхности.

Построение модели процесса резания упрочненным инструментом осуществлялось в два этапа. На первом – методом случайного баланса были определены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на эксплуатационные характеристики облученного инструмента [9]. Затем на основе многофакторного эксперимента было проведено комплексное исследование влияния режимов

лазерной импульсной обработки и условий эксплуатации металлорежущего инструмента на его стойкость, заключающееся в нахождении методами регрессионного анализа адекватной функциональной связи между стойкостью инструмента и режимами упрочнения и эксплуатации.

В многофакторной постановке метод случайного баланса позволил проранжировать не только факторы, но и их взаимодействия и в первом приближении построить математическую модель, связывающую стойкость инструмента с факторами, оказывающими существенное влияние на нее.

По результатам 16 опытов были последовательно выделены наиболее существенные эффекты и их парные взаимодействия, для которых математическая модель исследуемого процесса имеет вид [9]:

$$T = 33,9 - 12,5X_1 - 18,25X_4 - 15,0X_5 - 14,6X_1X_3 + 10,65X_2X_4 - 8,4X_1X_8 - 11,2X_6X_7 + 6,35X_4X_5 + 4,3X_5X_8, \quad (1)$$

где X_1 – скорость резания, X_2 – энергия облучения, X_4 – глубина резания, X_5 – подача, X_6 – задний угол резца, X_7 – передний угол резца, X_8 – кратность обработки и X_3 – облучаемая грань резца. При проведении экспериментов также учитывалось наличие защитного газа Ar в зоне облучения.

Анализ результатов экспериментов показал, что режимы лазерного облучения резцов не оказывают прямого влияния на стойкость инструмента, но их роль проявляется, прежде всего, в эффектах взаимодействия, например: “энергия облучения – глубина резания”, “скорость резания – облучаемая грань” и др. (см. (1)). Здесь имеет место отчетливо выраженная нелинейность функции отклика системы: коэффициенты регрессии для эффектов взаимодействия существенно превышают ошибку в их определении и по величине мало отличаются от коэффициентов регрессии при линейных членах. Положительная величина эффекта при анализе двойных взаимодействий указывает на увеличение стойкости при высоких значениях обоих факторов. Так, энергия облучения должна быть выбрана максимально возможной

при резании с большими значениями глубины резания. При отрицательной величине эффекта увеличение стойкости резцов будет наибольшим при низком значении одного и высоком значении другого фактора. Поэтому резцы, используемые при малых скоростях точения, следует обрабатывать по задней грани, где в данном случае в основном локализован износ.

На основании анализа уравнения (1), описывающего влияние факторов, принадлежащих как области режимов резания, так и области режимов упрочнения, и их парных взаимодействий, можно дать предварительные рекомендации по ЛТО инструмента и последующему его применению. Учитывая, что для повышения производительности токарной обработки используется резание с большими скоростями, увеличение стойкости следует ожидать при обработке резцов на воздухе по передней грани с низкими значениями кратности и энергии облучения. При этом резание должно осуществляться с низкими значениями подачи при малой толщине срезаемого слоя обрабатываемого металла. Такое сочетание величин варьируемых факторов целесообразно при чистовой токарной обработке. Очевидно, что для повышения эффективности чернового точения выбор режимов упрочнения должен быть иным.

Анализ различных схем включения в модель нелинейных эффектов показывает, что значимыми помимо вышеперечисленных являются взаимодействия типа “кратность обработки – наличие защитного газа”, “облучаемая грань – наличие защитного газа” и др. [9]. Анализ указанных эффектов показывает, что выбор и построение адекватного уравнения регрессии должен осуществляться с учетом всех факторов из области режимов облучения, в том числе и влияния защитного газа.

Некоторые взаимодействия, а также их роль и появление в ряду значимых связаны с влиянием среды, в которой проводилось упрочнение. Так, взаимодействие “облучаемая грань – наличие защитного газа” с положительной величиной эффекта показывает, что для увеличения стойкости резцов должно быть проведено облучение их задней грани в

среде защитного газа, а облучение передней грани – на воздухе. В последнем случае на передней грани резца у его режущей кромки образуется окисная пленка, наличие которой обуславливает при резании снижение коэффициента трения между сходящей стружкой и рабочей поверхностью резца, что в свою очередь способствует снижению термодинамической напряженности процесса и увеличению стойкости инструмента.

Для изучения влияния окисной пленки на характеристики изнашивания упрочненного инструмента были проведены стойкостные испытания упрочненных проходных токарных резцов. Особое внимание было обращено на поведение инструмента в период его приработки [6]. Установлено что лазерная обработка на воздухе позволяет регулировать скорость изнашивания резцов (рис. 1). Для неупрочненного инструмента среднее время выхода на стационарный участок износа составляет ~20-25 мин, для резцов, упрочненных в среде инертного газа ~10-13 мин и, наконец, для резцов, упрочненных на воздухе ~3-5 мин.

В наибольшей степени влияние лазерной обработки на характеристики изнашивания упрочненного инструмента проявляется после обработки на воздухе по передней режущей грани резцов, когда на поверхности контакта образуется окисная пленка. Измерения электрохимическим способом, в основе которого лежит восстановление исследуемых окислов до металла или низшего окисла, показали, что состав окисных пленок существенно отличается для разных марок сталей [10]. Установлено, что предельная толщина оксида в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) составляет ~0,2 мкм, а в составе окисной пленки присутствуют окислы MoO_3 , WO_3 , Fe_3O_4 в зависимости от содержания легирующих элементов в исходном материале. На рис. 2 представлены результаты электрохимического анализа состава оксидов в ЗЛВ. По времени восстановления оксида можно определить как тип оксида, так и его толщину. Указанные отличия в составе образующихся оксидов обуславливают изменение характера изнашивания облученного инстру-

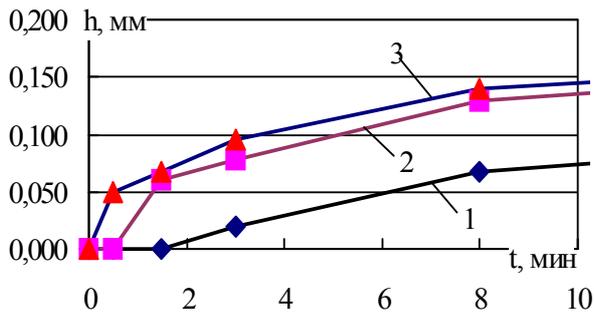


Рис. 1. Величина линейного износа резцов на участке приработки:

1 – без лазерной обработки; 2, 3 – лазерная обработка по передней грани; 2 – в среде аргона; 3 – на воздухе

мента и, таким образом, подтверждают необходимость назначения режимов лазерной обработки в зависимости от режимов эксплуатации. Образующаяся при лазерной обработке экранирующая пленка при резании является своеобразной твердой смазкой, вследствие чего уменьшается площадь контакта стружки с резцом и коэффициент трения на передней поверхности инструмента. Уменьшение площади контакта на передней поверхности после лазерной обработки на воздухе приводит к увеличению удельного давления и соответствующему росту износа инструмента в период приработки и последующему сокращению времени приработки.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что окисная пленка оказывает существенное влияние на трибомеханические характеристики процесса резания, изменяет динамику изнашивания инструмента. Состав пленок определяет характер и интенсивность изнашивания инструмента, поэтому необходимо назначать режимы упрочнения в зависимости от марки инструментального материала и режимов эксплуатации инструмента.

Учитывая результаты предварительных опытов [9], при проведении эксперимента по построению адекватной модели процесса резания упрочненным инструментом число варьируемых факторов было сокращено до четырех.

Необходимые для построения модели экспериментальные результаты были получены при тчении конструкционной легированной стали 12Х2Н4А проходными резцами из быстрорежущей стали Р18. Оценивалась

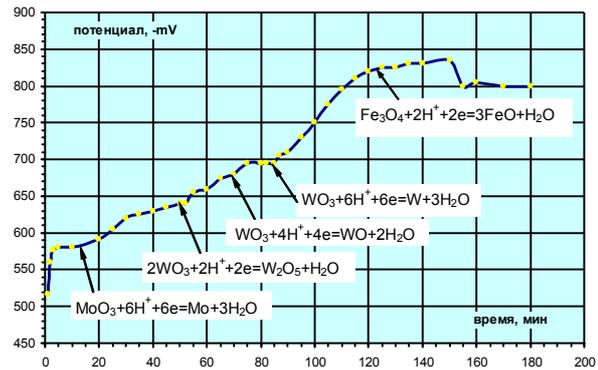


Рис. 2. Потенциалы восстановления оксидов на поверхности стали Р6М5 после лазерной обработки

стойкость T резцов при варьировании скорости V (фактор X_1), глубины резания t (X_3), энергии облучения E (X_2) и переднего угла резца γ (X_4). При этом выбирались следующие уровни изменения факторов: X_1 – 55 м/мин – на верхнем уровне и 30 м/мин – на нижнем; X_2 – 62 Дж и 30 Дж; X_3 – 2 мм и 1 мм; X_4 – 10 и 6 град соответственно. Во всех экспериментах величина подачи была равна $s=0,2$ мм/об, а величина заднего угла для всех резцов – $\alpha=8$ град.

Облучение резцов после стандартной термообработки проводилось на модернизированной лазерной технологической установке “Квант-16” с энергией в импульсе до 70 Дж. Размер пятна в зоне обработки выдерживался постоянным и составлял $4,5 \times 4,5$ мм. Это обеспечивалось использованием фокусирующего призмного раstra. Применялось однократное облучение резцов на воздухе по передней режущей грани. Стойкостные испытания инструмента осуществлялись на токарно-винторезном станке модели 1К62 с бесступенчатой коробкой передач. Критерий затупления – износ на задней грани, равный 0,4 мм.

При построении линейной модели стойкости упрочненного инструмента в качестве ядра плана была выбрана дробная реплика 2^{4-1} с генерирующим соотношением $X_4 = X_1 X_2 X_3$ [11]. В качестве функции отклика была принята стойкость резцов по достижению ими критерия затупления.

Анализ экспериментальных результатов

показал, что полученная линейная модель стойкости упрочненного инструмента оказалась им не адекватной [11].

Переход к квадратичной модели осуществлялся в соответствии с центральным композиционным ротатабельным униформ-планированием второго порядка со “звездным” плечом равным 1,682 по стандартной методике [2].

Полученная на основании экспериментальных данных квадратичная модель стойкости инструмента, упрочненного импульсным лазерным излучением, описывающая функциональную связь его стойкости с комплексом физико-технологических параметров, характеризующих как режим облучения, так и режим его эксплуатации в кодированном виде для статистически значимых оценок коэффициентов имеет следующий вид:

$$Y = 139,35 - 50,56X_1 + 29,20X_1X_2 - 27,74X_2X_3 - 17,89X_2^2 - 42,77X_3^2. \quad (2)$$

Проверка адекватности полученной модели стойкости при доверительной вероятности $P=0,05$ по критерию Фишера показала, что квадратичное уравнение регрессии (2) достаточно хорошо описывает исследуемый процесс.

После замены кодированных значений факторов натуральными и соответствующих преобразований уравнение стойкости упрочненного инструмента (2) принимает вид:

$$T = -175,37 - 10,76V + 672,75t + 5,43E + 0,15VE - 3,47Et - 0,07E^2 - 171,1t^2. \quad (3)$$

Поскольку в полученной модели (2) присутствуют линейные, квадратичные члены и эффекты взаимодействия первого порядка, то физическая интерпретация ее весьма затруднительна. На величину стойкости наряду с линейными факторами существенное влияние оказывают эффекты их взаимодействия, такие как: “скорость резания – энергия облучения” (X_1X_2) и “глубина резания – энергия облучения” (X_2X_3). Влияние скорости резания на стойкость инструмента, также как и глубины резания определяется не только квадратичными или линейными эффектами, но и эффектами взаимодействия первого по-

рядка, которые зависят от уровня, принимаемого другим фактором, в частности, X_2 , характеризующим энергию лазерного облучения. Поэтому оценка степени влияния, как скорости, так и глубины резания на величину параметра оптимизации не может быть однозначной.

Наличие в уравнении регрессии (2) эффектов взаимодействия (например: X_1X_2 и X_2X_3) свидетельствует о неаддитивном вкладе в изменение стойкости влияния отдельных факторов, что обуславливает необходимость выбора условий облучения в соответствии с конкретными режимами резания. Последнее является одним из резервов повышения существующего уровня стойкости упрочненного инструмента.

Интерпретация результатов моделирования процесса лазерного упрочнения инструмента

Согласно полученной адекватной квадратичной модели на стойкость упрочненного инструмента значимо влияют три фактора: V , E , t . В такой постановке задача интерпретации результатов исследования сводится к разработке рекомендаций по оптимальному назначению режима облучения при данном режиме точения. Типичный вид поверхности отклика при фиксированных значениях одного из варьируемых факторов ($V=55$ м/мин и $V=30$ м/мин) представлен на рис. 3а,б. Здесь достаточно отчетливо прослеживается тенденция взаимосвязи стойкости упрочненного инструмента, как с режимом его упрочняющей обработки, так и с режимом эксплуатации. В частности, заметное увеличение стойкости наблюдается с ростом энергии лазерного облучения при глубине резания, не превышающей 1,5 мм (рис. 3а). Однако детальный анализ поведения инструмента может быть осуществлен только на основе построения двух мерных сечений поверхности отклика, получаемых в результате канонического преобразования уравнения регрессии для двух выбранных факторов при фиксированном значении третьего.

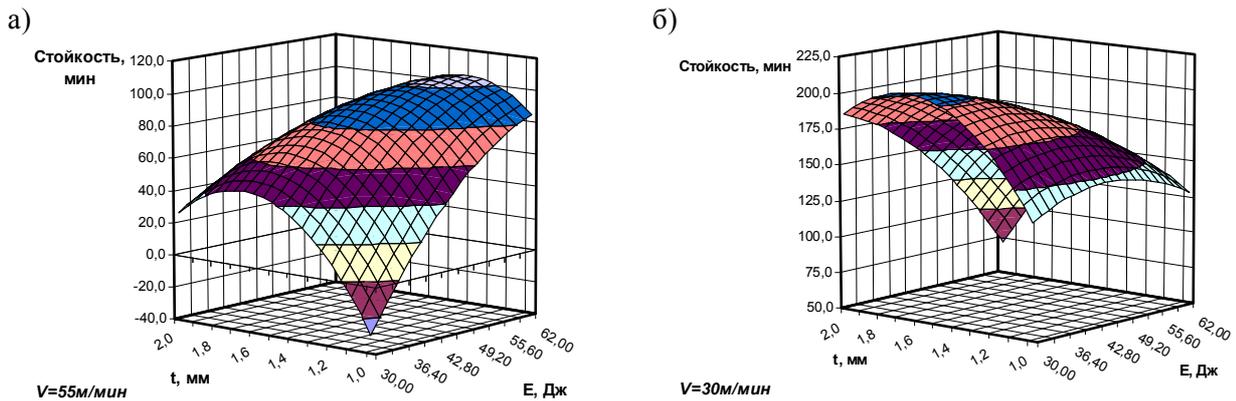


Рис. 3. Участок поверхности отклика в реализованном диапазоне изменения факторов: а – V=55 м/мин; б – V=30 м/мин

В частности, каноническое уравнение регрессии для сочетания факторов, определяющих глубину резания (X_3) и энергию лазерной обработки (X_2) при $X_1=+1$ ($V=55$ м/мин) имеет вид [12]:

$$-11,70X_2^2 - 48,96X_3^2 = Y - 104,71. \quad (4)$$

Соответствующие уравнения регрессии могут быть построены и для других сочетаний 2-х варьируемых факторов.

Двухмерные сечения поверхности отклика, построенные в координатах (E, t) приведены на рис. 4.

Из рассмотрения уравнения (4), которое является уравнением эллипса в каноническом виде и описывает поведение функции цели (стойкости упрочненного инструмента) при вариации энергии лазерного облучения рабочей поверхности резцов и глубины резания при скорости резания $V=55$ м/мин (рис. 4), следует вывод о сложном и взаимообуслов-

ленном совместном влиянии режимов резания и облучения на стойкость упрочненного инструмента. Данные зависимости были получены после подстановки в уравнение (4) различных значений стойкости и представляют собой семейство линий равной стойкости T (мин) в диапазоне вариации переменных, определенном при проведении эксперимента. Значения стойкости упрочненных резцов проставлены рядом с кривыми равной стойкости. Удаление от центра эллипса в любом направлении ведет к снижению стойкости резцов.

Анализ уравнения (4) позволяет сделать следующие выводы, касающиеся выбора условий облучения и эксплуатации упрочненного инструмента.

Стойкость облученного инструмента существенным образом зависит от совместного влияния режима упрочнения и режима точения. Повышение энергии обработки при данном значении глубины резания приводит к увеличению стойкости более чем в два раза, причем при минимально возможном энергокладе при облучении стойкость практически не превышает значений, достигнутых для контрольного инструмента. По данным эксперимента стойкость неупрочненного инструмента на режимах, соответствующих центру плана эксперимента, составляет ~ 52 мин. Анализ также показывает, что при одинаковом уровне введенной энергии наибольшая стойкость достигается с ростом глубины резания.

Такую особенность изменения стойкости упрочненного инструмента (рис. 4) можно объяснить, если принять температуру на-

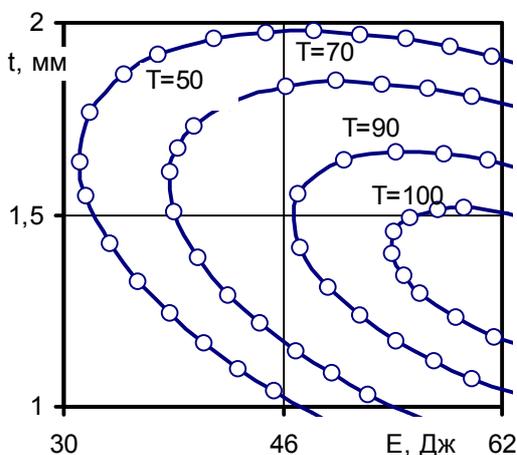


Рис. 4. Стойкость упрочненного инструмента при вариации режимов резания и упрочнения при $V=55$ м/мин.

грева материала в зоне облучения в первом приближении пропорциональной плотности поглощенной энергии и построить двухмерное сечение поверхности отклика в координатах температура – глубина резания.

Анализ показывает, что при температурах ниже 900-1000 °С преимущественное влияние на процесс изнашивания облученного инструмента оказывает окисная пленка, образующаяся при облучении. Оно сводится к понижению коэффициента трения в зоне контакта при резании, что в итоге уменьшает время приработки инструмента [6]. С ростом температуры в зоне закалки интенсифицируется процесс растворения карбидов и насыщения γ -фазы легирующими элементами. При дальнейшем повышении плотности энергии облучения в структуре ЗЛВ быстрорежущих сталей увеличивается количество остаточного аустенита [13-16]. Причем, например, по данным [14, 15] для сталей Р9К5 и Р6М5 его содержание может достигать 45% и увеличивается с ростом энергии облучения.

Если предположить, что износостойкость облученной зоны в условиях высоких контактных давлений и температур, характерных для обработки резанием, определяется степенью завершенности фазовых превращений в метастабильной структуре ЗЛВ, связанной со способностью остаточного аустенита после лазерной обработки превращаться в мартенсит деформации при трении, то тогда возможно объяснение экспериментального факта, заключающегося в том, что при одинаковом уровне вложенной энергии в принятом диапазоне режимов резания увеличение его глубины сопровождается ростом стойкости.

Для подтверждения этого факта проводились модельные испытания на трение по схеме диск-колодка на машине СМТ-1 [17]. Материал колодки – сталь Р18, материал диска – сталь 12Х2Н4А. Режимы трения: нагрузка $F = 180$ кГ, частота вращения диска $n = 65, 160$ и 250 об/мин. Лазерная обработка поверхности трения колодки проводилась на воздухе на установке “Квант-16” с использованием фокусирующего призматического раstra при энергии облучения 55-57 Дж. Определение количества остаточного аустенита проводилось методом внешнего стандарта, в качестве эталона использовались образцы отожженной стали ШХ15.

Исходная структура быстрорежущей стали Р18 после стандартной термообработки (закалка с 1280 °С, трёхкратный отпуск при 560 °С) представляет собой сорбит отпуска, на фоне которого выявляются крупные первичные карбиды типа M_6C и мелкие вторичные карбиды M_6C, MC , распределенные равномерно по всей поверхности шлифа, содержание остаточного аустенита по данным рентгенофазового анализа оценивается на уровне $\sim \leq 10\%$.

После лазерной обработки ЗЛВ исследуемой стали состоит из зоны вторичной закалки и зоны высокого отпуска. В первой зоне морфология карбидной фазы остается без изменений, вследствие незавершенности мартенситного превращения при лазерной обработке количество остаточного аустенита возрастает до 23-25% (рис. 5). Для зоны высокого отпуска характерна повышенная травимость матрицы из-за выделений мелкодисперсной карбидной фазы. Глубина зоны

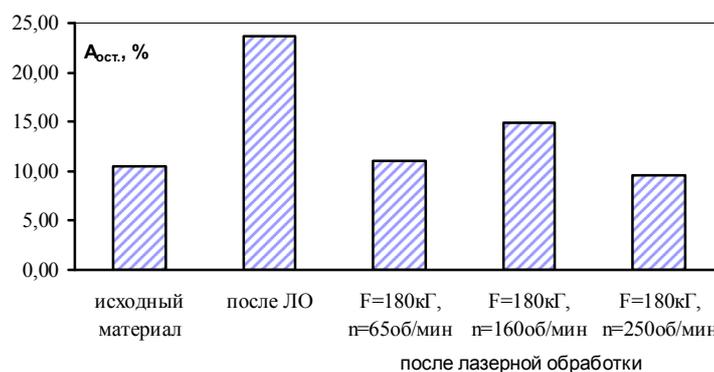


Рис. 5. Изменение количества остаточного аустенита после трения и лазерной обработки

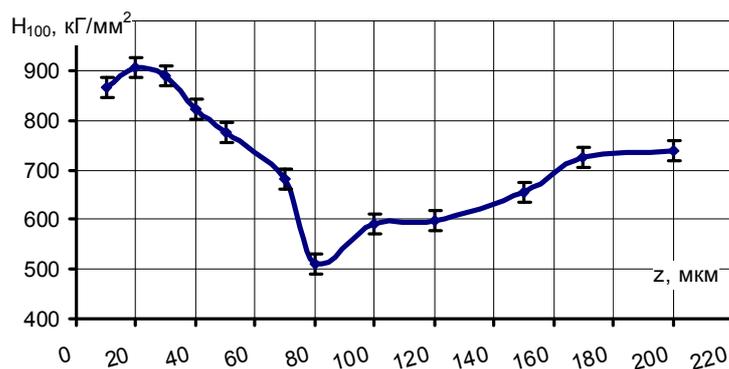


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине ЗЛВ

вторичной закалки при лазерной обработке составляет ~65-70 мкм (рис. 6).

Существенные изменения претерпевает структура поверхностного слоя стали Р18 после испытаний на трение. Уже при достаточно мягком режиме нагружения ($F=180$ кГ, $n=65$ об/мин) на поверхности трения материала колодки наблюдается развитие отпускных явлений, что выражается в повышенной травимости бывших мартенситных игл, выделении дисперсных специальных карбидов M_6C , MC (рис. 7а). Интенсификация режима трения (увеличение частоты вращения диска до значения $n=160$ об/мин) приводит к заметному снижению количества остаточного аустенита (рентгенографически остаточный аустенит не выявляется). Отмечаются признаки ограниченного растворения первичных карбидов (изменение конфигурации границ карбидных включений – при дальнейшем росте частоты вращения диска до значения $n=250$ об/мин) и полное исчезновение игольчатой структуры (полный распад твердого раствора с выделением специальных карбидов).

После лазерной обработки поверхности колодки и трения ($n=65$ об/мин) металлогра-

фически изменений структуры поверхностного слоя колодки в зоне контакта не обнаружено (рис. 7б), хотя рентгенографически уверенно фиксируется уменьшение количества остаточного аустенита почти в 2,0 раза. Отпускные явления в приповерхностных слоях зоны контакта стали Р18 начинаются при более интенсивном режиме трения ($n=160$ об/мин), что выражается в росте количества дисперсных карбидов и снижении остаточного аустенита до 12-15% (рис. 5). Распад твердого раствора (полное исчезновение игольчатой мартенситной структуры) выражен наиболее сильно при наиболее интенсивном режиме трения (частота вращения диска $n=250$ об/мин), но, тем не менее, этот процесс проявляется в меньшей степени, чем для образцов без лазерной обработки.

Таким образом, исследования структуры и фазового состава зоны трения инструментальных сталей после лазерной упрочняющей обработки показали, что ЛТО приводит к затягиванию отпускных явлений в зоне контакта при трении, а количество остаточного аустенита в приповерхностном слое уменьшается в 2,0 – 2,5 раза вследствие его пере-

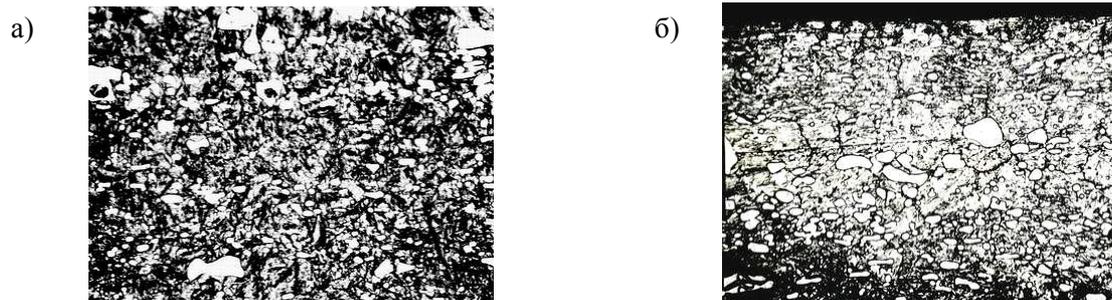


Рис. 7. Микроструктура поверхности стали Р18 после трения при $F=180$ кГ и $n=65$ об/мин: а – без лазерной обработки, $\times 400$; б – после лазерного облучения, $\times 500$

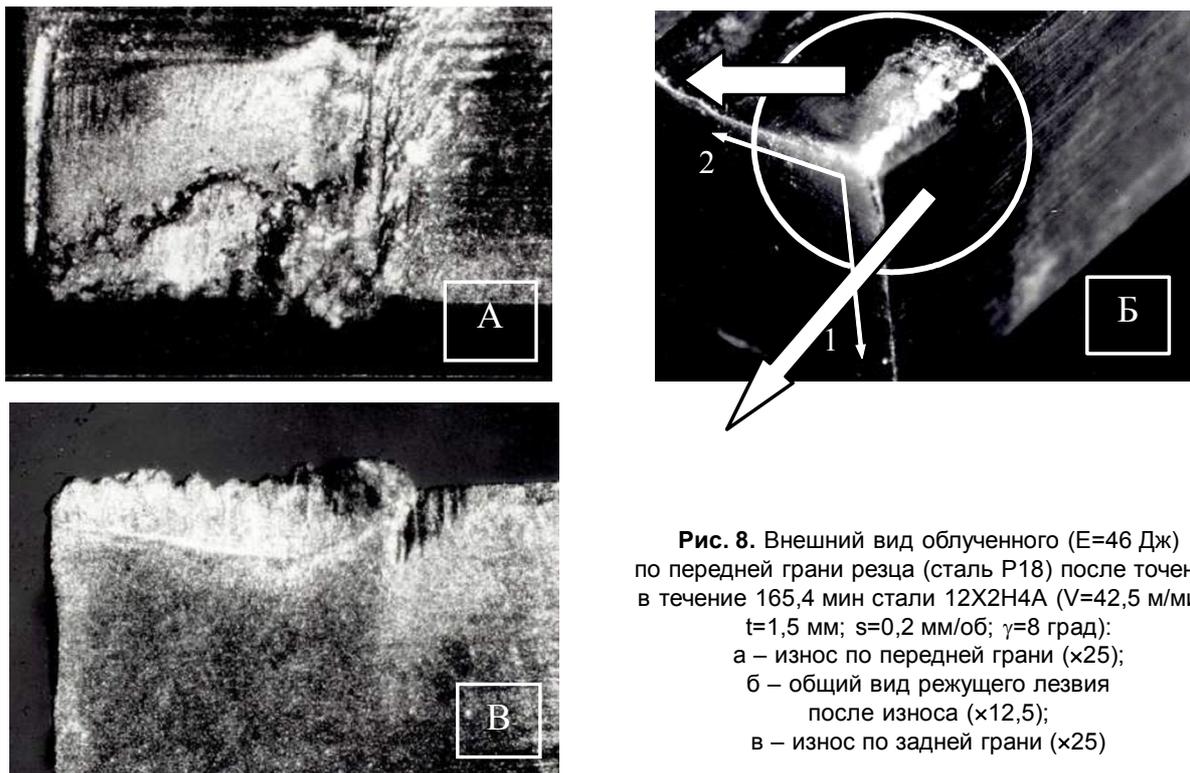


Рис. 8. Внешний вид облученного ($E=46$ Дж) по передней грани резца (сталь Р18) после точения в течение 165,4 мин стали 12Х2Н4А ($V=42,5$ м/мин; $t=1,5$ мм; $s=0,2$ мм/об; $\gamma=8$ град): а – износ по передней грани ($\times 25$); б – общий вид режущего лезвия после износа ($\times 12,5$); в – износ по задней грани ($\times 25$)

хода в мартенсит деформации при трении. Установленная корреляция содержания остаточного аустенита зоны трения с режимами нагружения позволяет утверждать, что наблюдаемый факт является одной из причин роста стойкости упрочненного инструмента в условиях высокой термодинамической напряженности процесса резания.

Вместе с тем анализ поведения полученных кривых равной стойкости накладывает определенные ограничения на область эффективного использования лазерной обработки. При фиксированной энергии облучения рост значений стойкости при увеличении глубины резания наблюдается только для значений t , не превышающих 1,5 мм, что совпадает с выводами, основанными на непосредственном анализе модели стойкости [11]. При $t > 1,5$ мм наблюдаемое снижение эффективности лазерного упрочнения, по-видимому, обусловлено ростом термодинамической напряженности в зоне резания и связанным с этим развитием процессов разупрочнения. Наблюдаемый эффект тем больше, чем больше глубина резания. При $t > 1,5$ мм стойкость инструмента практически не зависит от уровня энергии облучения и сохраняется практически постоянной для данного значения глу-

бины резания, т.е. в этих условиях точения лазерная обработка практически не оказывает влияния на работоспособность инструмента.

О наличии процесса разупрочнения при резании с большими глубинами резания свидетельствуют измерения микротвердости по вспомогательной задней грани резцов, износ которых достиг регламентной величины 0,4 мм, в направлении от вершины резца [7]. На рис. 8 представлен внешний вид поверхности износа резца, предварительно упрочненного лазерным излучением. Данные по измерению микротвердости вдоль вспомогательной режущей кромки (направление 2 на рис. 8б) приведены на рис. 9а, а вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних режущих граней резца (направление 1 на рис. 8б) – на рис. 9б.

Измерения проводились для трех резцов, испытанных при скорости резания $V=42,5$ м/мин и подаче $s=0,2$ мм/об. Для контрольного инструмента (без лазерной обработки) снижение микротвердости (расстояние от поверхности ~ 20 мкм) достигает максимальной величины на расстоянии ~ 300 мкм от вершины лезвия и составляет $\sim 70\%$ от микротвердости основного металла и сохраняется на протяжении $\sim 0,8$ мм (рис. 9а). После лазер-

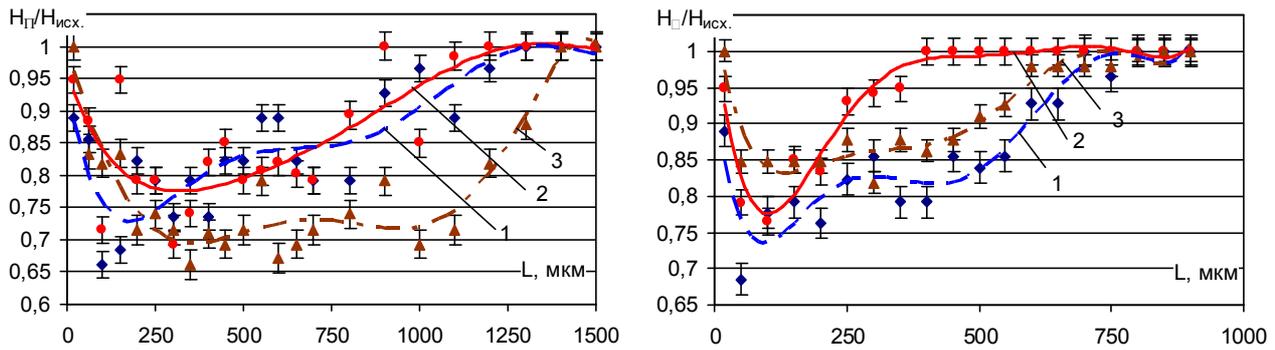


Рис. 9. Распределение микротвердости вдоль вспомогательной режущей кромки (а) и вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних режущих граней резца (б), на расстоянии ~ 20 мкм от поверхности ($V=42,5$ м/мин; $s=0,2$ мм/об; $\gamma=8$ град) после:
 1 – лазерной обработки ($E=46$ Дж; $t=2,34$ мм);
 2 – лазерной обработки ($E=46$ Дж; $t=1,5$ мм);
 3 – без лазерной обработки ($t=1,5$ мм)

ной обработки и точения с глубинами резания $t=1,5$ мм и $t=2,34$ мм снижение микротвердости менее значительно (кривые 1 и 2 на рис. 9а) 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, можно видеть, что кривые распределения микротвердости вдоль передней режущей грани практически повторяют распределение контактных давлений. Отсюда следует, что с точки зрения уменьшения термодинамической напряженности наиболее благоприятной является лазерная обработка для инструмента, работавшего при глубине резания 1,5 мм. При увеличении t уменьшается зона контакта стружки с резцом и длина пластического контакта, возрастает величина контактных давлений у передней режущей кромки, что приводит к уменьшению прочности материала инструмента и его преждевременному износу. На большем расстоянии от передней поверхности (~ 50 мкм) разупрочнение материала резца 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 резца выравнивание свойств материала прак-

тически отсутствует.

Измерения $H_{m, \text{м}}$, проведенные вдоль линии, образованной пересечением главной и вспомогательной задних граней изношенного инструмента (направление 1 на рис. 8б), показывают, что и в этом случае процесс разупрочнения наиболее ярко выражен для инструмента после точения с $t=2,34$ мм (кривая 1 на рис. 9б). Причем на большей глубине на этом же режиме точения степень разупрочнения сравнима с состоянием неупрочненного инструмента и особенно велика она у режущей кромки. 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)

Измеренное распределение микротвердости вдоль образующих режущих поверхностей резцов коррелирует с эпюрами контактных давлений, что свидетельствует о росте термодинамической напряженности в зоне резания при точении с глубиной резания $t > 1,5$ мм и соответствующем протекании процессов разупрочнения материала инструмента.

Таким образом, предпочтительные области эксплуатации облученного режущего инструмента можно определить следующим образом:

- ♦ точение при глубине резания, близкой к 1,5 мм;

♦ точение с высокими значениями скорости резания (при максимальном значении вложенной энергии);

Используя комплексный подход к оценке эффективности применения металлорежущего инструмента, упрочненного импульсным лазерным излучением, можно сформулировать ряд требований к условиям ЛТО инструмента и его эксплуатации.

Во-первых, облучение режущего инструмента следует проводить на воздухе по передней режущей грани. В этом случае у его режущей кромки образуется окисная пленка, наличие которой обуславливает при резании снижение коэффициента трения между сходящей стружкой и рабочей поверхностью, что в свою очередь способствует уменьшению температуры в зоне резания и увеличению стойкости инструмента.

Во-вторых, наиболее целесообразна эксплуатация упрочненного инструмента при более интенсивных режимах резания.

Сформулированные выше условия наиболее предпочтительной реализации лазерной обработки инструмента были проверены экспериментально в результате производственных стойкостных испытаний упрочненного инструмента. Режимы механической обработки соответствовали технологическим, обычно применяемым на данных типах операций.

Лазерному упрочнению на воздухе подвергались следующие типы инструмента:

♦ дисковые фрезы (P18 и P6M5) диаметром 130 мм и толщиной 3,0 мм. Упрочнение проводилось по боковой поверхности каждого зуба.

♦ сверла (P12M3Ф2К8 и P6M5) диаметром 18,3 мм. Обработка проводилась как по

задней, так и по передней поверхностям инструмента.

♦ строгальные резцы (P9K5); упрочнение по передней поверхности.

Результаты производственных испытаний приведены в таблице.

При испытании сверл (P12M3Ф2К8) установлено, что более эффективной является лазерная обработка передней поверхности инструмента, обеспечивающая повышение стойкости в ~1,8 раза. Тогда как стойкость сверл с упрочненной задней поверхностью оставалась на уровне контрольного инструмента. Также установлено, что упрочненные спиральные сверла (P6M5) имеют стойкость выше стойкости неупрочненного инструмента в 1,5 раза при $V=4,2$ м/мин; в 1,7 раза при $V=6,0$ м/мин; в 2,0 раза при $V=8,5$ м/мин.

В результате испытаний показана эффективность лазерной обработки инструмента на воздухе по передней режущей грани и применения упрочненного инструмента в условиях высокой термодинамической напряженности процесса резания. Следовательно, прямое экспериментальное подтверждение получили выводы, сделанные на основании анализа многофакторной модели процесса резания упрочненным инструментом.

Выводы

1. Применение многофакторного подхода к комплексному исследованию процесса лазерной упрочняющей обработки режущего инструмента позволило впервые установить существенное влияние на его стойкость эффектов взаимодействия, по величине соизмеримых с линейными и определяющих неаддитивный вклад в изменение стойкости влияния режимов резания и упрочнения.

Таблица. Результаты производственных испытаний

Инструментальный материал	Обрабатываемый материал	Коэффициент увеличения стойкости
Дисковые фрезы P18	12X2H	~1,9
Дисковые фрезы P6M5	X18H9T	~1,9
Сверла P12M3Ф2К8	XH73МБТЮ-ВД	~1,8
Сверла P6M5	40X	1,5-2,0
Строгальные резцы P9K5	Сплав XH68ВМТЮК-ВД	до 2 ^x раз

2. Показано, что для достижения наибольшего положительного эффекта при упрочнении необходимо лазерное упрочнение инструмента осуществлять с учетом конкретных режимов его эксплуатации.

3. Определены количественные характеристики, описывающие изменение стойкости упрочненного инструмента. Установлены области режимов резания, где использование лазерной обработки обеспечивает наибольшую стойкость упрочненного инструмента. Показано, что применение лазерной обработки наиболее эффективно для процесса резания с высокой термодинамической напряженностью.

4. Определены характеристики окисной пленки, образующейся на поверхности зоны лазерного воздействия. Установлено определяющее влияние пленки на интенсивность изнашивания упрочненного инструмента на участке приработки. Отличия в составе окисных пленок для различных инструментальных материалов обуславливают изменение характера изнашивания облученного инструмента и свидетельствуют о необходимости назначения режимов лазерной обработки в зависимости от режимов эксплуатации.

5. Разработаны и обоснованы рекомендации по рациональному использованию упрочненного инструмента. Установлено соответствие результатов производственных испытаний рекомендациям, сделанным при анализе модели стойкости упрочненного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Многофакторный подход при анализе упрочняющей обработки режущего инструмента. 1. Постановка задачи. Выбор и оценка наиболее значимых факторов / С.И. Ярьско, Т.К. Кобелева, С.В. Каюков, А.Л. Петров // Препринт ФИАН. М., 1994. №44.
2. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение. София: Техника, 1980.
3. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспери-

ментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980.

4. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. Киев: Наукова думка, 1990.
5. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. М.: Мир, 1982.
6. Ярьско С.И., Нерубай М.С. Физико-технологические особенности процесса резания инструментом, упрочненным лазерным излучением // Металлообработка. 2000. №1.
7. Нерубай М.С., Ярьско С.И. Моделирование процесса резания инструментом, упрочненным лазерным излучением // Справочник. Инженерный журнал. 2004. №5.
8. Ярьско С.И. Повышение эффективности лазерной термообработки токарного инструмента с учетом влияния режимов резания. // Инженерно-физический журнал. 2002. Т.75, №6.
9. Ярьско С.И., Каюков С.В., Нерубай М.С. Выявление методом случайного баланса факторов, существенно влияющих на стойкость режущего инструмента, упрочненного лазерным излучением // Физика и химия обработки материалов. 1996. №6.
10. Ярьско С.И. Нанопленки оксидов металлов зоны лазерной обработки инструментальных сталей и их влияние на работоспособность металлорежущего инструмента // Физическая мезомеханика. 2004. Т.7. Спец. вып. Ч.2.
11. Ярьско С.И., Каюков С.В., Кобелева Т.К. Многофакторный подход при анализе упрочняющей обработки режущего инструмента. 3. Модель стойкости режущего инструмента, упрочненного лазерным излучением // Препринт ФИАН. 2001. №23.
12. Ярьско С.И., Кобелева Т.К., Нерубай М.С. Многофакторный подход при анализе упрочняющей обработки режущего инструмента. 4. Интерпретация результатов моделирования процесса лазерного упрочнения токарных резцов // Препринт ФИАН. 2001. №47.
13. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки металлов. М.: Машиностроение, 1989.
14. Влияние структурно-фазовых превраще-

- ний в инструментальных материалах при лазерной термообработке на износостойкость режущего инструмента / *А.Н. Бекренев, Д.М. Гуреев, А.П. Лалетин и др.* // Физика и химия обработки материалов. 1990. №2.
15. Лазерная обработка быстрорежущей стали Р6М5 / *Т.П. Чупрова, А.М. Бернштейн, М.Н. Крянина, В.П. Полухин* // Электронная обработка материалов. 1989. №3.
16. *Крапошин В.С.* Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1994. №2.
17. *Яресько С.И., Каковкина Н.Г.* Структура и фазовый состав зоны трения инструментальных сталей после лазерной обработки. // *Высокие технологии в машиностроении / Материалы международной научно-технической конференции, Самара, 20-22 октября 2004.* Самара: СамГТУ, 2004.

MODELLING RESULTS OF CUTTING BY THE HARDENED TOOL

© 2006 S.I. Yaresko

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The analysis of the multifactorial model adequately describing functional interrelation of wear resistance of the hardened tool with physicochemical parameters, describing both a regime of laser irradiation, and a regime of cutting was carried out. It was shown, that for achievement of the greatest positive effect the irradiation of the tool is necessary for carrying out in view of concrete regimes of its operation. Recommendations on rational use of the hardened tool are developed and proved. Conformity of results of industrial tests to the recommendations made at the analysis of model of wear resistance of the hardened tool was established.