

1554346

На правах рукописи

Митрофанов Андрей Анатольевич

УДК 621.91.02:539.12.04

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЫСТРОРЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность:

- 05.03.01. - Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструмент
05.03.07. - Оборудование и технология лазерной
обработки

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 1997.

55-121
000 5

Работа выполнена в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Зеленцова Н.Ф.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
Сафонов А.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Гречишников В.А.
кандидат технических наук,
Волгин В.И.

Ведущая организация - АО "Завод им. В.А.Дегтярева"

Защита состоится "26" июня 1997 года в 10.00 на за-
седании специализированного совета К.053.15.15 в Московском го-
сударственном техни-
107005, Москва, Б
С диссерт
им. Н.Э.Баумана.

Автореф

Ученый се
диссертаций

Подписано к
Заказ 122

1554346

з.
мана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Проблема повышения работоспособности режущего инструмента является одной из главных проблем металлообработки. В настоящее время затраты на режущий инструмент составляют более 15% общих затрат механообрабатывающего производства, причем тенденция роста этих расходов очевидна. Кроме того, вынужденные простои из-за смены и наладки инструмента составляют от 16 до 35% рабочего времени.

Поэтому повышение работоспособности режущего инструмента является важным резервом роста эффективности производства и производительности механической обработки.

Для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик режущего инструмента инструментальный материал должен обладать комплексом свойств, среди которых основными являются высокая твердость, теплостойкость и прочность. Достижение сочетания этих свойств в одном материале вызывает значительные трудности, в связи с чем, появление новых инструментальных материалов, удовлетворяющим указанным требованиям, весьма редко.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения работоспособности режущего инструмента является упрочнение его рабочих поверхностей, при этом достигается сочетание высоких прочностных свойств базового материала с твердостью и теплостойкостью поверхностного слоя. В настоящее время разработано около ста видов упрочняющих технологий режущего инструмента. Общая оценка эффективности применения метода упрочнения основывается на дифференциальных оценках его технологических возможностей, экономических результатов и экологических последствий его применения. Однако, универсальных методов упрочнения и составов износостойких покрытий нет. Они различны для разных типов инструментов, обрабатываемых материалов и режимов резания.

Для повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента из быстрорежущих сталей весьма перспективным направлением является применение лазерных технологий, среди которых важное место принадлежит лазерной закалке. Преимущества лазерной закалки обусловлены возможностью подвода в зону обработки высокой концентрации энергии, обеспечением локальности воздействия на упрочняемую поверхность инструмента, экологической чистотой, а так же



большими возможностями автоматизации и управления процессом. Лазерная закалка проводится на открытом воздухе без применения вакуума или закалочных сред.

Большинство работ по повышению работоспособности режущего инструмента методами лазерной технологии подтверждают принципиальную возможность повышения стойкости инструмента от 2 до 5 раз, однако значительная часть исследователей использовала импульсные лазерные установки. Применение импульсных лазеров вследствие низкой производительности, сложности и нестабильности процесса упрочнения не способствовали широкому внедрению лазерной закалки режущего инструмента в практику металлообработки.

Создание технологических непрерывных CO_2 -лазеров и возможность использования в составе лазерных технологических комплексов автоматических манипуляторов позволяет не только значительно повысить производительность самого процесса лазерной закалки, но и создает возможность получения стабильности свойств упрочненных поверхностей. Однако, процесс упрочнения режущего инструмента CO_2 -лазерами исследован недостаточно. Кроме этого, к настоящему времени нет единой точки зрения на механизм упрочнения быстрорежущих сталей под воздействием лазерного излучения, приводящий к повышению работоспособности режущих инструментов. Так же отсутствуют исследования о влиянии режимов лазерной закалки на стойкость упрочненных инструментов, и условиях их рациональной эксплуатации.

Цель работы. Исходя из рассмотрения состояния вопроса целью данной работы является повышение работоспособности режущего инструмента из быстрорежущих сталей с путем лазерной закалки.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования проводились на базе разработанного методического плана, включающего общие и частные методики с использованием современных представлений теории резания, физики металлов и металловедения, математической статистики.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях. В лабораторных условиях проводились исследования зависимости эксплуатационных свойств быстрорежущих сталей (микротвердость, износостойкость, теплостойкость) от энергетических параметров лазерной закалки. Металлографические исследования проводились с применением современного оборудования: оп-

тического микроскопа "Neophot-32", электронно-сканирующего микроскопа "CamScan-4VD" и энергодисперсионного анализатора "Link Analitikal-AN10000". Лазерная закалка исследуемых образцов и режущего инструмента проводилась излучением непрерывного CO₂-лазера МТЛ-2 с использованием многокоординатного манипулятора с ЧПУ 125А.

В производственных условиях проводились сравнительные стойкостные испытания упрочненных режущих инструментов с целью определения оптимальных режимов лазерной закалки, а так же обоснования условий рациональной эксплуатации упрочненных инструментов, получение характеристик износа, разработки стойкости. зависимостей. Статистическая обработка результатов исследований проводилась на IBM 486 DX2.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- на основании комплексных исследований определено микроструктурное состояние поверхностных слоев, при котором происходит повышение стойкости режущих инструментов при закалке непрерывным лазерным излучением: максимальная стойкость при лазерной закалке закаленно-отпущенных быстрорежущих инструментов достигается при переводе мартенсита отпуска в мартенсит закалки при сохранении мелкодисперсных карбидных и карбонитридных частиц;
- обоснованы оптимальные энергетические параметры режимов лазерной закалки концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5, позволяющие получить повышение стойкости до 2 раз без оплавления поверхности;
- определены рациональные режимы резания концевых фрез после лазерной закалки.

Практическая ценность.

- проведенный анализ механизма износа режущих инструментов позволяет рекомендовать для локальной лазерной закалки конкретные конструктивные элементы инструмента, лимитирующие его стойкость;
- определены режимы лазерной закалки позволяющие получить оптимальное микроструктурное состояние поверхностных слоев режущих инструментов при котором обеспечивается повышение стойкости в 1,6-2 раза;
- рекомендовано проводить лазерную закалку без оплавления поверхности с целью сохранения геометрических параметров рабочих элементов;

- разработаны промышленные рекомендации для внедрения технологического процесса лазерной закалки быстрорежущего инструмента в практику.

Результаты исследований прошли промышленную апробацию на АО "Завод им. В.А.Дегтярева" и АО "Ковровский экскаваторный завод".

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: "Технология обработки: физика процессов и оптимальное управление" - г. Уфа, 1995 г., "Лазерные технологии-95" - г. Шатура, 1995г., "Лазеры в науке, технике, медицине" - г. Сергиев Посад, 1996г., на Международном конгрессе "Молодежь и наука - третье тысячелетие" - г. Москва, 1996 г., на семинаре Московского химического общества им. Д.И.Менделеева "Новое в технике и технологии инструмента" - г. Москва, 1995 г.

Работа обсуждалась на научных семинарах кафедры "Процессы и инструментальные системы механической и физико-химической обработки материалов" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

По результатам исследований опубликовано 6 печатных работ, получено 1 положительное решение по заявке на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 245 страницах и содержит 105 страниц машинописного текста, 98 рисунков, 27 таблиц, список литературы из 91 источника.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы и дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен обзор и анализ ранее выполненных работ по упрочнению режущего инструмента. Показано, что несмотря на существующее значительное количество упрочняющих технологий, универсальных методов упрочнения режущих инструментов не существует. Анализ научно-технической литературы показал, что стойкость инструментов после лазерной закалки повышается от 2 до 5 раз по сравнению с неупрочненным инструментом. Большинство работ проводилось по исследованию влияния импульсной лазерной закалки на структуру и свойства быстрорежущих сталей. В литературе практи-

чески отсутствуют данные о влиянии непрерывного лазерного излучения на формирование структур быстрорежущих сталей, приводящих к повышению стойкости режущих инструментов.

Обзор состояния вопроса по износу осевых режущих инструментов показал, что в процессе резания изнашиваются все рабочие элементы инструмента. Однако его стойкость лимитируется износом одного или группы определенных элементов. Локальность воздействия лазерного излучения позволяет проводить обработку именно этих рабочих элементов.

Исходя из анализа литературных данных сформулированы задачи исследования:

1. Провести анализ механизма износа режущих инструментов и влияния состояния заточенных поверхностей на их работоспособность.
2. Обосновать рациональные режимы лазерной закалки и исследовать их влияние на работоспособность режущего инструмента.
 - исследовать влияние режимов лазерной закалки на структуру и свойства быстрорежущих сталей;
 - провести предварительные стойкостные испытания с целью оценки влияния режимов лазерной закалки на работоспособность концевых фрез;
 - провести полные производственные испытания инструмента;
3. Разработать стойкостные модели инструмента учитывающие режимы лазерной закалки и условия эксплуатации.
4. Разработать рекомендации по применению лазерной закалки для повышения работоспособности инструмента в производственных условиях.

Во второй главе сформулированы общая и частная методики проведения экспериментальных исследований.

Стойкостные испытания концевых фрез проводились на заготовках из конструкционной стали 45 ГОСТ 1050-88 на универсально-фрезерном станке ФУ-251 без применения СОГС. Испытаниям подвергались концевые фрезы $\varnothing 12$, 18 и 20 мм ГОСТ 17026-71, изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5 ГОСТ 19265-73. Лазерная закалка режущего инструмента и образцов из быстрорежущей стали, прошедших предварительную закалку и 3-х кратный отпуск, проводилась на лазерном технологическом комплексе, состоящем из непрерывного CO_2 -лазера МТЛ-2 и автоматизированного манипулятора с ЧПУ А125. Обработка инструмента осуществлялась без оплавления поверхности для сохра-

нения геометрических параметров режущей части и избежания последующей заточки. В качестве обобщающего параметра лазерной закалки использовалась удельная погонная энергия E_z , Дж/мм².

Все партии исследуемых концевых фрез подвергались тщательному входному контролю. Инструменты не удовлетворяющие техническим требованиям ГОСТ 17024-71 в испытаниях не использовались.

Исследование влияния режимов лазерной закалки на эксплуатационные свойства быстрорежущих сталей проводились в лабораторных условиях на кафедрах МТ-2 и МТ-12 МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Теплостойкость образцов из быстрорежущей стали Р6М5 определялась путем измерением твердости по Виккерсу на приборе ТП-7р после отпуска от различных температур. Исследование влияния режимов лазерной закалки на износостойкость быстрорежущей стали проводилось по методике проф. Г.И.Грановского на установке, имитирующей процесс резания. Микроструктура быстрорежущих сталей в зонах лазерного воздействия (ЗЛВ) изучалась на изготовленных шлифах после травления 4% раствором HNO_3 с помощью оптического микроскопа "Neophot 32", электронно-сканирующего микроскопа "Camscan 4VD" и энергодисперсионного анализатора "Link Analitikal-AN10000". Микротвердость определялась на микротвердомере ПМТ-3.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью методов математической статистики.

В третьей главе приведены результаты лабораторных исследований зависимости микроструктуры и эксплуатационных свойств быстрорежущих сталей (микротвердость, теплостойкость и износостойкость) от режимов лазерной закалки.

Микроструктура зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) стали Р6М5, полученная после обработки излучением непрерывного CO_2 -лазера, имеет сложное слоистое строение. В общем случае выделяются три зоны: зона оплавления, зона закалки из твердой фазы и переходная зона. В верхней части зоны оплавления (ЗО) формируется достаточно однородная ячеисто-дендритная структура. Для нижней части ЗО характерна значительная неоднородность структуры. Несмотря на присутствие δ -феррита, микротвердость здесь имеет весьма высокие значения: $H_v = 8900 - 9400$ МПа, что объясняется выделением медкодисперсных карбидных частиц при кристаллизации микрообъемов жидкой фазы, сильно обогащенных легирующими элементами.

Зона закалки из твердой фазы (ЗТВ) имеет вид светлого сла-

ботравящегося слоя с мелкодисперсным строением. В самом общем виде в ней кроме мартенсита и остаточного аустенита имеются нерастворившиеся карбиды.

Структурно-фазовые превращения в ЗТВ определяются не только величиной энергетических параметров лазерного излучения, но и исходным состоянием стали. После лазерной закалики отожженной быстрорежущей стали без оплавления поверхности микротвердость в ЗТВ ($H_{\mu}=7100-7900$ МПа) не превышает значений микротвердости стали после объемной закалки и отпуска, что связано с малой насыщенностью твердого раствора из-за нерастворения карбидов.

После лазерной закалки закаленно-отпущенных сталей микротвердость достигает значений $H_{\mu}=7100-10500$ МПа. Эти данные свидетельствуют о том, что закаленно-отпущенных сталей более приемлемы режимы лазерной обработки с небольшим энерговыделением во избежание растворения карбидов. Основным смыслом лазерной обработки в этом случае - перевести мартенсит отпуска в мартенсит закалки, и за счет этого получить прирост твердости поверхностного слоя.

Условия эксплуатации режущего инструмента приводят к тому, что в зоне резания температура может достигать более $400-600^{\circ}\text{C}$. В таких условиях, сохранение твердости режущими элементами инструмента является важным требованием.

Измерение твердости образцов из стали Р6М5 после отпуска от температур в диапазоне $300-750^{\circ}\text{C}$ показало, что в ЗТВ сохраняются более высокие значения твердости, чем в исходной структуре. Повышение теплостойкости образцов после лазерной закалки без оплавления поверхности с $E_{\Sigma}=6-27$ Дж/мм² составило $8,8-12,9^{\circ}\text{C}$, что существенно сказывается на стойкости режущих инструментов.

Характерным является то, что интенсивность (I_{Hv}) разупрочнения в ЗТВ после отпуска от 650°C превышает интенсивность разупрочнения исходной структуры, что объясняется различием механизмов упрочнения в структурах, полученных после объемной термообработки и последующей лазерной закалки. В случае лазерной закалки образуются структуры пересыщенные углеродом и легирующими элементами, являющиеся более неравновесными и нестабильными при нагреве.

Результаты исследований показали, что применение лазерной закалки приводит к повышению износостойкости быстрорежущих сталей. Повышение износостойкости нельзя считать следствием только увеличения микротвердости, т.к. образцы после лазерной закалки с

удельной погонной энергией $E_s=1,3-2,6 \text{ Дж/мм}^2$ имели практическую одинаковую микротвердость $H_v=10010-11750 \text{ МПа}$. Однако лазерная закалка $E_s 1,3-1,5 \text{ Дж/мм}^2$ привела к максимальному повышению износостойкости, что можно объяснить сохранением мелкодисперсных карбидных фаз.

В четвертой главе представлены исследования зависимости стойкости концевых фрез от энергетических параметров лазерной закалки.

К настоящему времени отсутствуют общие методы точного решения нестационарных задач теплопроводности. Учитывая сложность математического описания геометрии режущей части инструмента и энергетических параметров лазерного излучения в данной работе режимы лазерной закалки концевых фрез определялись экспериментальным путем.

Одним из условий лазерной закалки режущего инструмента принималось сохранение геометрических параметров режущей части неизменными, для избежания последующей переточки. Контрольные измерения шероховатости задней поверхности и радиуса округления режущей кромки показали, что лазерная закалка по применяемым режимам не приводит к изменению шероховатости и величины радиуса округления режущей кромки. Различные значения стойкости концевых фрез после лазерной закалки объясняются только изменением режущих свойств.

Результаты предварительных стойкостных испытаний позволили сделать вывод о том, что на стойкость инструмента зависит от энергетических параметров лазерной закалки. Существуют вполне определенные значения удельной погонной энергии лазерной закалки E_s , позволяющее получить максимальное повышенную стойкость. Для концевых фрез $\varnothing 12 \text{ мм}$ это значение составляет $E_s=0,25 \text{ Дж/мм}^2$ (рис.1,2), для концевых фрез $\varnothing 20 \text{ мм}$ - $E_s=0,75 \text{ Дж/мм}^2$, а для цинкованных фрез $\varnothing 18 \text{ мм}$ - $E_s=2,67 \text{ Дж/мм}^2$.

Микроструктурные исследования, проведенные после стойкостных испытаний, позволили установить, что глубина упрочненной зоны у концевых фрез $\varnothing 12 \text{ мм}$ после лазерной закалки с удельной погонной энергией $E_s=2 \text{ Дж/мм}^2$ и $E_s=0,25 \text{ Дж/мм}^2$ отличается незначительно и составляет 400-500 мкм. Однако характер изменения микротвердости по глубине ЗЛВ имеет значительные различия (рис.3).

При малой удельной погонной энергии ($E_s=0,25 \text{ Дж/мм}^2$) на поверхности ЗЛВ имеются весьма высокие значения микротвердости

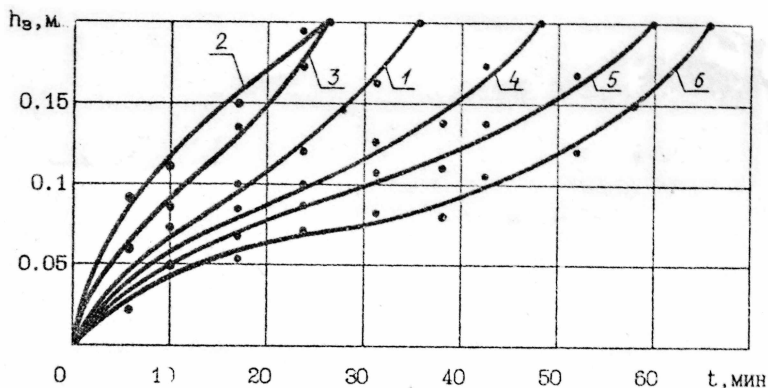


Рис.1. Зависимость износа задней поверхности зубьев концевых фрез $\varnothing 12$ мм от времени работы при обработке стали 45. Режимы резания: $V=0,4$ м/с, $S_z=0,05$ мм/зуб, $t=b=3$ мм.
 1 - СТО; Лазерная закалка с E_s , Дж/мм²:
 2 - $E_s=2$ Дж/мм²; 3 - $E_s=1,25$ Дж/мм²; 4 - $E_s=1$ Дж/мм²;
 5 - $E_s=0,75$ Дж/мм²; 6 - $E_s=0,25$ Дж/мм².

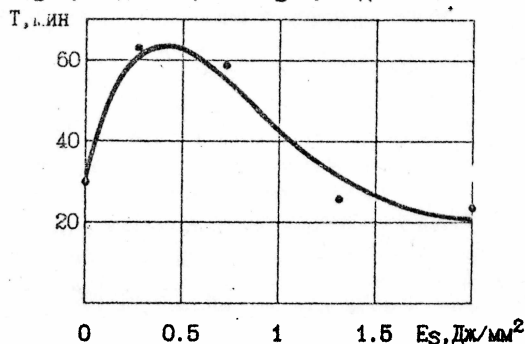


Рис.2. Зависимость стойкости концевых фрез $\varnothing 12$ мм от удельной погонной энергии E_s , Дж/мм² при фрезеровании стали 45
 Режимы резания: $V=0,4$ м/с, $S_z=0,05$ мм/зуб, $t=b=3$ мм.

$H_{\mu}=12000$ МПа, при увеличении удельной погонной энергии ($E_s=2$ Дж/мм²) значения микротвердости у поверхности ЗЛВ снижаются до значений $H_{\mu}=8200-9700$ МПа. Несмотря на то, что в обоих случаях после лазерной закалки в поверхностных слоях инструментов образуется структура с большими значениями микротвердости, чем у исход-

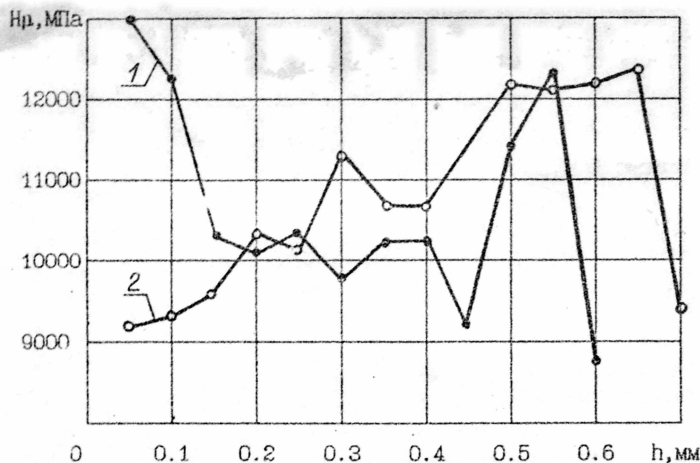


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя вадней поверхности зубьев концевых фрез $\varnothing 12$ мм после лазерной закалки с различными значениями E_s :
1 - $E_s=0,25$ Дж/мм²; 2 - $E_s=2$ Дж/мм².

ной, стойкость фрез существенно отличается.

Металлографические исследования, проведенные на электронно-сканирующем микроскопе "Camscag 4VD" показали, что под воздействием лазерного излучения в зависимости от значений удельной погонной энергии происходит изменения в состоянии карбидной фазы.

Лазерная закалка с удельной погонной энергией $E_s=0,25$ Дж/мм² практически не вызывает изменений. Лазерная закалка с удельной погонной энергией 2 Дж/мм² приводит к растворению примерно 25% карбидов, причем уменьшение количества карбидных частиц происходит за счет растворения мелкодисперсных карбидов размером до 0,6 мкм, которые в значительной мере определяют износостойкость и микротвердость быстрорежущих сталей.

Результаты металлографических исследований фрез после лазерной закалки позволили выявить механизм повышения стойкости быстрорежущих инструментов после закалки непрерывным лазерным излучением. Было установлено, что для проведения лазерной закалки быстрорежущих инструментов энергетические параметры нужно выбирать

так чтобы перевести мартенсит отпуска исходного состояния в мартенсит закалки, избегая при этом растворения мелкодисперсных карбидных и карбонитридных частиц. При этих условиях достигается повышение стойкости упрочненного инструмента в 1,5-2 раза.

В пятой главе представлены результаты сравнительных стойкостных испытаний упрочненных инструментов, позволяющие определить зависимость их стойкости от таких параметров режима резания, как скорость резания и подача на зуб.

Результаты стойкостных испытаний концевых фрез $\varnothing 12$ мм показывают, что увеличение скорости резания приводит к снижению стойкости концевых фрез. Эта зависимость сохраняется при всех значениях подачи на зуб и не носит экстремального характера (рис.4).

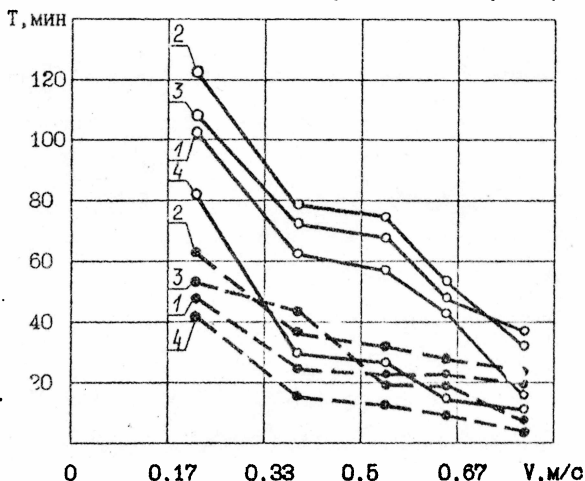


Рис.4. Зависимость стойкости концевых фрез $\varnothing 12$ мм от скорости резания (V) при фрезеровании стали 45 с различными значениями подачи на зуб S_z : 1 - $S_z=0,05$ мм/зуб; 2 - $S_z=0,08$ мм/зуб; 3 - $S_z=0,1$ мм/зуб; 4 - $S_z=0,125$ мм/зуб; (○) - после лазерной закалки с $E_s=0,25$ Дж/мм²; (●) - СТО.

В качестве дополнительной оценки режущих свойств концевых фрез $\varnothing 12$ мм была использована интенсивность изменения стойкости (I_T), представляющая собой первую производную по скорости зависимости $T=f(V)$. Полученные зависимости показывают более интенсивное снижение стойкости упрочненных инструментов при увеличении ско-

рости резания от $V=0,25$ м/с до $V=0,79$ м/с. Зависимость стойкости концевых фрез $\varnothing 20$ мм от скорости резания, полученная в результате испытаний, аналогична стойкостной зависимости для концевых фрез $\varnothing 12$ мм.

Исследование зависимости стойкости концевых фрез от подачи на зуб проводилась на основании результатов стойкостных испытаний концевых фрез $\varnothing 12$ мм. Полученные результаты (рис.5) показывают, что зависимость $T=f(S_z)$ носит немонотонный характер при скоростях резания $V=0,25-0,63$ м/с. При скорости резания $V=0,79$ м/с стойкость концевых фрез снижается при увеличении подачи на зуб.

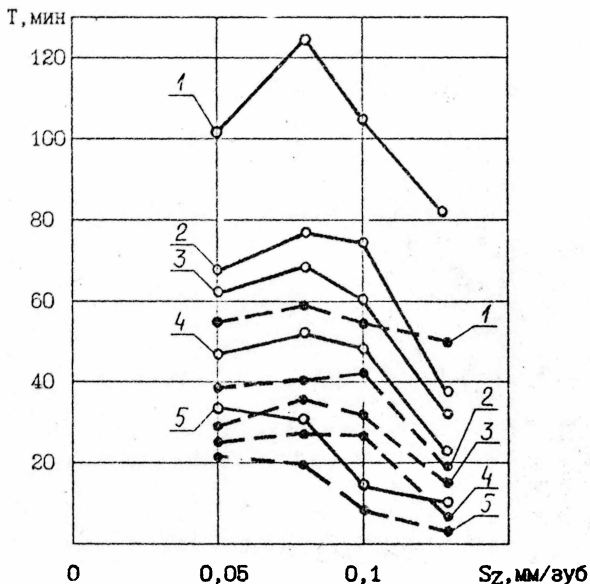


Рис.5. Зависимость стойкости концевых фрез $\varnothing 12$ мм от подачи на зуб (S_z) при фрезеровании стали 45 с различными значениями скорости резания V : 1 - $V=0,25$ м/с; 2 - $V=0,4$ м/с; 3 - $V=0,50$ м/с; 4 - $V=0,63$ м/с; 5 - $V=0,79$ м/с.
(о) - после лазерной заправки с $E_s=0,25$ Дж/мм²; (•) - СТО.

Установлено, что наибольшее увеличение стойкости концевых фрез (в 1,9-2,16 раза) после лазерной заправки по сравнению с инс-

инструментами после стандартной термообработки получено при эксплуатации со скоростями резания до 0,5 м/с и подачами на зуб $S_z=0,05-0,08$ мм/зуб.

Результаты стойкостных испытаний показали, что при фрезеровании стали 45 со скоростями резания от 0,25 м/с до 0,80 м/с и подачами на зуб от 0,05 мм/зуб до 0,125 мм/зуб износ концевых фрез носит абразивный характер. Применение лазерной закалки для повышения работоспособности концевых фрез не вызывает изменения механизма износа. Анализ кривых износа показал, что увеличение периода стойкости инструментов, обработанных лазерным излучением, происходит за счет увеличения периода основного износа.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. В диссертационной работе предложено решение актуальной задачи - повышение работоспособности режущих инструментов из быстрорежущих сталей с помощью лазерной закалки. На основании комплексных исследований определено микроструктурное состояние поверхностных слоев, при котором происходит повышение стойкости режущих инструментов при закалке непрерывным лазерным излучением.

2. Исследование микроструктуры поверхности быстрорежущих сталей после их обработки излучением непрерывного CO_2 -лазера показало, что зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет неоднородное, слоистое строение, обусловленное различием температур нагрева по глубине. Повышение микротвердости в зоне оплавления ($H_{\text{и}}$ до 10000 МПа) может быть обусловлено как образованием мартенсита так и выделением высокодисперсных карбидов вследствие высокой концентрационной неоднородности. Повышение микротвердости в зоне закалки из твердой фазы ($H_{\text{и}}$ до 11000 МПа) определяется получением мартенсита с достаточной степенью его насыщения за счет растворения некоторой части карбидов.

3. Показано принципиальное различие в микротвердости зон лазерного воздействия (ЗЛВ) образцов быстрорежущих сталей P18 и P6M5 с различным исходным состоянием: отожженных и закаленно-отпущенных. В отожженных образцах наибольшая микротвердость достигается после лазерной обработки с высокими значениями удельной погонной энергии ($E_{\text{с}}$ до 20 Дж/мм²), преимущественно с оплавлением поверхности, при обработке без оплавления поверхности микротвердость имеет значения $H_{\text{и}}=8000$ МПа и она резко уменьшается по глубине ЗЛВ. В закаленно-отпущенных образцах при лазерной обработке

без оплавления поверхности достигается значительно большая микротвердость (H_{μ} до 11000 МПа), при этом сохраняется относительное постоянство значений микротвердости по глубине ЗЛВ.

4. Показано, что высокая твердость быстрорежущих сталей, полученная в результате лазерной закалки, сохраняется и после отпуска от температур в широком диапазоне (300–650°C). Установлено повышение температуры теплостойкости сталей после лазерной закалки на 9–18°C, что может оказать существенное влияние на стойкость режущих инструментов. Выявлено, что микроструктура ЗЛВ после отпуска от 620°C обладает большей интенсивностью разупрочнения, объясняющейся нестабильностью и неравновесностью этих структур.

5. Установлено, что лазерная закалка с удельной погонной энергией $E_s=1,3-2,6$ Дж/мм² приводит к повышению износостойкости быстрорежущей стали Р6М5. Причем снижение удельной погонной энергии лазерной обработки в указанном интервале приводит к возрастанию износостойкости. Это может быть объяснено тем, что износостойкость в значительной степени зависит от структурного состояния в ЗЛВ: максимальные значения износостойкости в результате лазерной закалки закаленно-отпущенных сталей достигается при переходе мартенсита отпуска в мартенсит закалки при сохранении большей части мелкодисперсных карбидов, которые во многом определяют износостойкость быстрорежущих сталей.

6. Получены значения энергетического параметра лазерной закалки E_s , позволяющее получить максимальное повышение стойкости, отклонение от которых приводит к снижению стойкости. Для концевых фрез $\varnothing$ 12 мм это значение составляет $E_s=0,25$ Дж/мм², для концевых фрез $\varnothing$ 20 мм – $E_s=0,75$ Дж/мм². В случае лазерной закалки цинированных фрез $\varnothing$ 18 мм повышение стойкости достигается после обработки с удельной погонной энергией $E_s=2,57$ Дж/мм². Обработка по указанным режимам приводит к повышению стойкости инструмента в 1,6–2 раза.

7. Проведенные исследования показали, что повышение работоспособности быстрорежущего инструмента с исходной закаленно-отпущенной структурой после лазерной закалки может иметь следующую природу: в поверхностных слоях образуется структура мартенсита закалки с повышенной микротвердостью ($H_{\mu}=10000-12000$ МПа) при сохранении мелкодисперсных карбидных и карбонитридных частиц, которые в значительной мере определяют износостойкость быстрорежу-

щих сталей.

8. По результатам производственных испытаний установлено, что увеличение скорости резания приводит к монотонному снижению стойкости, причем концевые фрезы после лазерной закалки более чувствительны к изменению скорости резания. Зависимость стойкости от подачи на зуб имеет экстремальный характер. При фрезеровании со скоростями резания $V=0,25-0,63$ м/с наибольшая стойкость получена при подаче на зуб $S_z=0,08$ мм/зуб. При фрезеровании со скоростью резания $V=0,79$ м/с увеличение подачи на зуб от $S_z=0,05$ мм/зуб до $S_z=0,125$ мм/зуб вызывает снижение стойкости. Установлено, что наибольшее приращение стойкости концевых фрез после лазерной закалки по сравнению с инструментами после стандартной термообработки получено при эксплуатации со скоростями резания до 0,5 м/с и подачами на зуб $S_z=0,05-0,08$ мм/зуб.

9. По результатам исследований получены обобщенные стойкостные модели концевых фрез $\varnothing 12$ мм при обработке стали 45 в полиномиальном виде:

- для фрез после лазерной закалки

$$T=0,833 - 1,108 \cdot V + 0,518 \cdot S + 0,444 \cdot V^2 - 0,736 \cdot S^2 - 0,032 \cdot V \cdot S$$

- для фрез после стандартной термообработки

$$T=0,846 - 1,111 \cdot V + 0,495 \cdot S + 0,515 \cdot V^2 - 0,693 \cdot S^2 - 0,144 \cdot V \cdot S;$$

10. Для концевых фрез $\varnothing 20$ мм получена зависимость стойкости от скорости резания при обработке стали 45 в виде:

- для фрез после лазерной закалки

$$T = \frac{18,31 \cdot e^{0,564V}}{v^{2,16}}$$

- для фрез со стандартной термообработкой

$$T = \frac{14,58 \cdot e^{0,521V}}{v^{1,71}}$$

Полученные модели позволяет оценить влияние режимов резания (скорость резания и подача на зуб) на стойкость инструмента.

10. Показано, что при фрезеровании стали 45 со скоростями резания от 0,25 м/с до 0,80 м/с и подачами на зуб от 0,05 мм/зуб до 0,125 мм/зуб износ концевых фрез носит абразивный характер. Применение лазерной закалки для повышения работоспособности концевых фрез не вызывает изменения механизма износа. Анализ кривых износа показал, что увеличение периода стойкости инструментов,

обработанных лазерным излучением, происходит за счет увеличения продолжительности периода нормального износа.

11. Разработаны рекомендации для практического использования лазерной закалки в технологическом процессе изготовления режущего инструмента.

Основное содержание работы отражено в опубликованных работах:

1. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущих сталей методом лазерной обработки / А.Н.Сафонов, Н.Ф.Зеленцова, А.А.Митрофанов и др. // Станки и инструмент.- 1995.- №5.- С. 17-21.

2. Исследование процесса лазерной обработки инструмента из быстрорежущих сталей / А.Н.Сафонов, Н.Ф.Зеленцова, А.А.Митрофанов и др. // Тезисы докладов V международной конференции "Лазерные технологии-95".- Шатура.- 1995.- С. 42.

3. Сафонов А.Н., Зеленцова Н.Ф., Митрофанов А.А. Обоснование режимов лазерной обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6МБ // Технология обработки: физика процессов и оптимальное управление: Тезисы докладов международной конференции посвященной 75-летию со дня рождения Алексея Дмитриевича Макарова.- Уфа.- 1995.- С.70-71.

4. Сафонов А.Н., Зеленцова Н.Ф., Митрофанов А.А. Использование лазерного излучения для упрочнения режущего инструмента из быстрорежущих сталей // Лазеры в науке, технике, медицине: Тезисы докладов VII международной научно-технической конференции.- Сергиев Посад.- 1996.- С. 79-81.

5. Упрочнение поверхности инструмента из быстрорежущих сталей с помощью непрерывных CO₂-лазеров / А.Н.Сафонов, Н.Ф.Зеленцова, А.А. Митрофанов и др.// Сварочное производство, -1996, -№8, -С.18-21.

6. Разработка научных основ новых методов эффективной механической обработки и эксплуатации инструментов: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ КМИП; Руководитель Древаль А.Е.; Исполн.: Н.Н.Зубков, Н.Ф.Зеленцова, А.Н. Сафонов, А.А.Митрофанов и др.- Инв. N 02960006564. - М., 1995.- 118 с.

7. Способ закалки концевой режущего инструмента с помощью непрерывного излучения технологического лазера / А.Н. Сафонов, Н.Ф. Зеленцова, А.А. Митрофанов и др. // Положительное решение по заявке на изобретение за N 95109543.