

УДК 674.093

ВЫБОР РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НОЖЕЙ РУБИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СУХОСТОЙНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

© *А.Е. Алексеев, д-р техн. наук, проф.*

А.И. Думанский, зав. лаб.

И.О. Думанский, канд. техн. наук, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Сев. Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: i.dumanskij@agtu.ru

Сухостойная древесина имеет высокие прочность и твердость. Это приводит к значительному абразивному износу лезвия ножа рубительной машины при выработке щепы из такой древесины. Требование к материалу ножей в этом случае – более высокая твердость режущей кромки (HRC 62...65 в сравнении с традиционной HRC 56...58) при необходимой динамической прочности. Их нельзя получить подбором особого легирования сталей или корректировкой режимов традиционной термообработки. Требуемых характеристик можно достичь лазерной термообработкой лезвия ножа, сформировав в нем особое структурное состояние стали. Использование лазерной термообработки для легированных сталей ножей представляет ряд проблем, главная из которых – отсутствие научно обоснованных режимов этой обработки. Целью данной работы являлась разработка таких режимов. Исследования проведены на стандартных ножах из стали 6X7BCMФ на лазерной установке «Квант-15». В ходе экспериментов изучено влияние мощности излучения при постоянном диаметре излучения на твердость поверхностного слоя и количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия. Мощность излучения регулировали изменением напряжения заряда конденсаторов накачки. Зоны лазерного воздействия располагались без перекрытия при изменении напряжения заряда конденсаторов в диапазоне 400...850 В с шагом 50 В, коэффициентом перекрытия 0,50 и 0,75. Оптимизацию проводили по трем факторам: максимальной твердости зоны лазерного воздействия, минимальному (не более 5 %) содержанию в этой зоне остаточного аустенита, минимальной степени оплавления. В результате определен оптимальный режим лазерной обработки импульсами диаметром 3,0 мм при частоте их следования 2 Гц и скорости перемещения луча 3 мм/с, что обеспечило коэффициент перекрытия, равный 0,5, при напряжении конденсаторов накачки 750...800 В, соответствующем энергии лазерного импульса 5...6 Дж. При этом оптимальная структура лезвия достигается при твердости HRC 63...64 и высокой динамической прочности.

Ключевые слова: сухостойная древесина, рубительные машины, легированные стали, лазерная термообработка.

Механические свойства сухостойной древесины, определяющие особенности процесса резания в рубительных машинах для ее переработки, значительно отличаются от свойств свежесрубленной древесины. Эти особенности определяются более высокими для сухостойной древесины показателями прочности и твердости, а также повышенным содержанием ферментирован-

ных до твердого состояния смол и пониженным содержанием влаги, особенно во внешних слоях, через которые происходит ударное врезание ножа при переработке такой древесины в технологическую щепу. Такие характеристики сухостойной древесины ведут к значительному абразивному износу лезвия ножа, снижению его ресурса до очередной переточки и, как следствие, снижению общей эффективности процесса переработки как по производительности, так и по качеству получаемой щепы (уход от стандарта по фракционному составу и геометрическим параметрам элементов щепы).

Анализ литературных данных, касающихся процесса резания в рубительных машинах [8], а также опыт использования легированных инструментальных сталей для обработки материалов повышенной твердости и абразивности, позволяют определить необходимые требования к материалу ножей рубительных машин при переработке сухостойной древесины для обеспечения высоких показателей их ресурса и достижения необходимой эффективности процесса переработки.

Эти требования сводятся, прежде всего, к достижению более высокой твердости режущей кромки (лезвия) ножа при сохранении необходимой динамической прочности (стойкости к выкрашиванию и разрушению при ударном воздействии) как режущей кромки, так и тела ножа.

Твердость режущей кромки ножа в этом случае необходимо повысить до HRC 62...65 (в сравнении с традиционной HRC 56...58) при сохранении в ее структуре в максимальной степени высокотвердой карбидной фазы и некоторого количества относительно мягкого остаточного аустенита в качестве релаксирующей при ударном воздействии связки, обеспечивающей стойкость лезвия к выкрашиванию.

Для обеспечения динамической прочности тела ножа необходимо при достижении высокой твердости лезвия (HRC 62...65) сохранить исходную (стандартную) структуру и свойства материала на удалении 10...15 мм от лезвия и стандартное распределение твердости по всей ширине ножа (1/3 со структурой сорбита по ГОСТ 17342–81) [6].

Анализ литературных источников [1, 7] показывает, что требования к материалу ножей рубительных машин, определенные выше, не могут быть реализованы подбором особого легирования сталей для изготовления ножей рубительных машин или корректировкой режимов традиционной термической обработки. Тем более, этого невозможно достичь в эксплуатационных условиях при использовании стандартных ножей и возможностей обслуживающего производства предприятия.

Требуемые прочностные и ресурсные характеристики материала ножей могут быть достигнуты путем использования применительно к стандартным ножам локальной (вдоль режущей кромки) лазерной термической обработки (ЛТО) промышленными импульсными лазерами или лазерами непрерывного излучения. Обеспечиваемая в таком случае минимальная зона термического влияния лазерного излучения позволяет сохранить структуру и свойства тела

ножа без изменений, при этом в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) может быть сформирована структура сверхмелкозернистого свежезакаленного мартенсита при сохранении (почти без растворения) высокотвердых карбидов с прослойками остаточного аустенита.

Использование ЛТО для локального упрочнения режущего инструмента используется достаточно широко, но применительно к ножам рубительных машин имеется ряд проблем: отсутствие информации о влиянии ЛТО на износостойкость инструментальных легированных сталей, используемых для изготовления ножей, и научно обоснованных режимов ЛТО, которые могут быть использованы при упрочнении ножей рубительных машин.

Целью данной работы являлась разработка технологического процесса упрочнения ножей рубительных машин с использованием ЛТО для получения необходимой их износостойкости при переработке сухостойной древесины.

Материалы и методики исследования

В качестве объекта исследования выбраны широко распространенные ножи рубительных машин, изготовленные по ГОСТ 17342–81 [6].

Химический состав материала исследуемых ножей определяли с помощью дугового дифрактометра. Сравнение исследуемой стали со стандартной показало, что по основным химическим элементам ее состав близок к стандартному, за исключением несколько большего содержания хрома (8,74 %). Это не должно было серьезно сказаться на механизмах и кинетике фазовых превращений при термической обработке (в том числе и лазерной).

Сталь 6X7BCMF относится к инструментальным легированным штамповым сталям высокой прокаливаемости и повышенной вязкости [9]. По равновесной структуре сталь доэвтектоидная, в закаленном состоянии – мартенситного класса. Структура стали в отожженном состоянии – сорбитообразный перлит + карбиды, в закаленном состоянии (закалка 1050 °С, масло) – мартенсит, остаточный аустенит и карбиды при твердости HRC 60...62, после отпуска (560...570 °С) в течение 2 ч – троостомартенсит или троостит + карбиды + остаточный аустенит ($\leq 3\%$) с твердостью HRC 56...58 [2, 9].

Лазерная термическая обработка исследуемых образцов выполнялась на установке лазерной сварки, резки и термообработки «Квант-15», которая сфокусированным лазерным излучением позволяет производить локальную термообработку металлов (упрочнение, отпуск, нормализация) со скоростью до 10 имп./с и диаметром фокального «пятна» до 2 мм.

В качестве объектов для исследования и оптимизации режимов ЛТО использовали полноразмерный нож рубительной машины с исходной традиционной термической обработкой, состоящей из объемной закалки (нагрев в печи до 1050 °С, выдержка 10...12 мин, закалка в масле) и последующего отпуска в течение 2 ч при температуре 550...560 °С.

Выбор постоянных и переменных факторов эксперимента основан на анализе литературных данных по ЛТО высоколегированных

инструментальных сталей, а также на главной цели исследования – поиске оптимальных режимов ЛТО, позволяющих достичь максимально высокой твердости режущей кромки ножа при достаточной степени равномерности свойств вдоль всей лезвийной области. Принимая во внимание требования получения максимальной производительности и возможно наибольшей ширины ЗЛВ в качестве постоянных факторов были приняты: максимальный диаметр пятна лазерного луча – 3 мм, максимальная длительность импульса – 5 мс. Таким образом, плотность энергии излучения, которая определяет эффект и результат лазерного воздействия на поверхность ножа, в этом случае зависит только от энергии импульса излучения, которая, в свою очередь, является функцией напряжения конденсаторов накачки установки. Это напряжение принято главным переменным фактором.

Кроме напряжения конденсаторов накачки, в части эксперимента, касающейся отработки реальной технологии ЛТО ножа (режима моторизованного перемещения, обеспечивающего равномерность свойств по длине лезвия), в качестве дополнительного переменного фактора принят коэффициент перекрытия и, как функция коэффициента перекрытия – скорость перемещения ножа при ЛТО.

Оценочные показатели и методы их измерения

Твердость ЗЛВ – один из основных показателей, характеризующий эффективность применения ЛТО. Твердость ЗЛВ измеряли на следующих участках: на поверхности, по глубине, в переходных зонах. На изменение твердости по глубине и на поверхностную твердость оказывает влияние напряжение зарядки конденсаторов, на твердость переходных зон – еще и коэффициент перекрытия.

Твердость поверхности ЗЛВ на экспериментальных образцах измеряли по методу Виккерса (ГОСТ 2999–75 [3]) на твердомере ТП-7Р-1 (ГОСТ 23677–79 [5]) при нагрузке на индентор 49 Н и времени выдержки под нагрузкой 15 с, микротвердость по ЗЛВ – по ГОСТ 9450–76 [4] на микротвердомере ПМТ-3 с ахроматическим эпиобъективом ($F = 6,16$, $A = 0,65$) и 15-кратным окуляром при нагрузке 100 г и времени выдержки под нагрузкой 5 с.

Диаметр ЗЛВ измеряли отсчетным микроскопом МПБ-2 с точностью до 0,05 мм. Но там, где границы зон лазерного воздействия были нечеткими или имели искажения, измерения проводили с точностью до 0,1 мм.

Анализ микроструктуры зон лазерного воздействия позволяет изучить процессы, происходящие в металле при лазерном излучении, а также путем идентификации закалочных структур выяснить причины получения высокой твердости.

Рентгеноструктурный анализ проведен на дифрактометре ДРОН-3 с использованием излучения железа (Fe) на длине волны $1,93728\text{Å}$ при напряжении на трубке 30 кВ и токе 15 мА. Характеристики входной щели 2-1-1. Дифрактограммы снимали по точкам, шаг сканирования $0,2^\circ$;

экспозиция 20 с; без фильтра. Были исследованы линии $\{200\}_\alpha$ и $\{110\}_\alpha$ мартенсита и линии $\{111\}_\gamma$ и $\{200\}_\gamma$ остаточного аустенита в диапазонах углов $80...90^\circ$, $53...60^\circ$ и $60...70^\circ$. По дифрактограммам оценивали количество остаточного аустенита в структуре, степень неоднородности мартенсита и степень искажения его решетки, количество углерода в мартенсите, степень прохождения начальных стадий отпуска (двухфазный распад).

Объем, содержание и последовательность проведения опытов

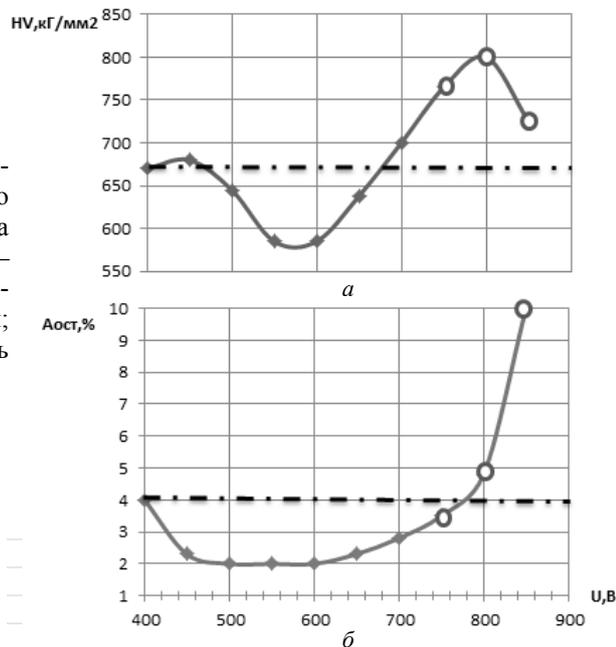
Опыты проводили в целях определения влияния режимов лазерной термической обработки на глубину, ширину, твердость и микроструктуру формируемых при этом ЗЛВ. В ходе экспериментов исследовали влияние мощности излучения на твердость поверхностного слоя и количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия при постоянном диаметре импульса излучения. Мощность излучения регулировали изменением напряжения заряда конденсаторов накачки. ЗЛВ располагались без перекрытия при изменении напряжения заряда конденсаторов в диапазоне 400...850 В с шагом 50 В, а также с коэффициентом перекрытия 0,50 и 0,75. После ЛТО с перекрытием путем измерения микротвердости, глубины закаленного слоя, а также анализа микроструктуры ЗЛВ уточняли наиболее приемлемый для упрочнения исследуемого объекта коэффициент перекрытия при оптимальном напряжении заряда конденсаторов накачки.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам первой серии опытов был получен график (см. рисунок) зависимости твердости (HV) зон лазерного воздействия и количества остаточного аустенита ($A_{ост}$) в них от напряжения (U) конденсаторов накачки (энергии импульса излучения) с целью определить оптимальный уровень этого параметра. Оптимизацию проводили по трем факторам: максимальной твердости ЗЛВ, минимальному (не более 5%) содержанию в ЗЛВ остаточного аустенита ($A_{ост}$) и минимальной степени оплавления. Оценка количества остаточного аустенита обеспечила надежную фиксацию режима с небольшой степенью растворения карбидной фазы и, следовательно, с максимальной долей наиболее высокотвердых фаз в структуре материала ножа – мартенсита и карбидов вольфрама, хрома и молибдена. Требование минимизации оплавления в ЗЛВ (еще лучше – полного отсутствия оплавления) обеспечивает минимальный объем металла при правке лезвия ножа ЛТО и, как следствие, увеличение ресурса ножа между повторными ЛТО в процессе эксплуатации ножей.

Анализ графиков показал, что по мере роста энергии лазерного излучения вначале (при $U = 400...450$ В) происходит некоторое нарастание твердости и снижение количества остаточного аустенита, связанное, видимо, с эффектами распада остаточного аустенита в исходной структуре и вторичного твердения за счет довыделения тугоплавких карбидов вольфрама и молибдена. В диапазоне 450...600 В сталь претерпевает отпускные явления и

Влияние напряжения конденсаторов накачки (энергии лазерного излучения) на свойства материала ножа в ЗЛВ: *a* – твердость, *б* – количество остаточного аустенита (○ – оплавление поверхности; - · - - – исправленный уровень параметров (до ЛТО))



разупрочняется. При уровне напряжения 600...650 В активируется процесс аустенизации и последующего мартенситного превращения – идет закалка. Рост твердости (до $HV_{\max} = 800 \text{ кг/мм}^2$) продолжается до $U = 750...800 \text{ В}$, затем твердость снижается за счет роста количества остаточного аустенита, являющегося следствием активного растворения карбидов и легирования твердого раствора тугоплавкими элементами. Такой эффект объясняется высокими температурами в ЗЛВ. Об этом свидетельствует и наличие значительного оплавления ЗЛВ при $U > 800 \text{ В}$, элементы которого фиксируются уже с напряжения 750 В.

Учитывая установленные закономерности и указанные выше факторы оптимизации (максимальную твердость, минимальное количество остаточного аустенита и степень оплавления в ЗЛВ), определяли оптимальный режим лазерной обработки одиночными импульсами диаметром 3,0 мм: напряжение конденсаторов накачки $U = 750...800 \text{ В}$, что соответствует энергии лазерного импульса $E = 5...6 \text{ Дж}$.

В качестве факторов оптимизации для выбора необходимого коэффициента перекрытия приняты наибольшая глубина и наилучшая равномерность поверхности ЗЛВ. Анализ полученных результатов показал, что при исследуемых коэффициентах перекрытия глубина зон практически равна и составляет 150...180 мкм, причем границы этих зон достаточно четкие (переходная зона по глубине не превышает 10...15 мкм).

В структуре ЗЛВ (мартенсит закалки с микротвердостью $HV_{\max} = 947 \text{ кг/мм}^2$) на глубине от поверхности 15...20 мкм наблюдается зона

с несколько повышенной твердостью, что связано с особенностями получения при высоких скоростях нагрева и охлаждения так называемого «свежезакаленного» мартенсита повышенной твердости. В переходной зоне по глубине имеет место резкое снижение микротвердости от 947 (мартенсит закалки) до 454 кг/мм² (троостомартенсит – структура тела ножа до термообработки). Переходные участки между зонами воздействия соседних лазерных импульсов имеют протяженность, не превышающую 80 мкм. Причем изменение микротвердости показывает, что мартенсит закалки (HV = 947 кг/мм²) претерпевает некоторый отпуск – образовался мартенсит отпуска с твердостью HV = 657...767 кг/мм².

Таким образом, для получения достаточного по глубине и структурно равномерного по ширине упрочненного слоя можно рекомендовать следующий режим лазерной термической обработки: диаметр зоны лазерного воздействия $D = 3,0$ мм; напряжение заряда конденсаторов накачки $U = 800$ В; коэффициент перекрытия $K_n = 0,5$.

Выводы

1. Подтверждена высокая эффективность лазерной термической обработки. Получаемый упрочненный слой на глубине 150...170 мкм имеет однородную структуру и свойства. Структура упрочненного слоя представляет собой свежезакаленный мартенсит микротвердостью HV = 947 кг/мм² с четкими границами по глубине и переходными зонами незначительной протяженности (менее 15 мкм) твердостью HV = 947...454 кг/мм². Средняя твердость лезвия – 800 кг/мм² (HRC 63-64).

2. Наилучшие характеристики зон лазерного воздействия достигнуты при следующих режимах ЛТО: диаметр зоны лазерного воздействия 3,0 мм, коэффициент перекрытия $K_n = 0,5$, напряжение зарядки конденсаторов $U = 800$ В (что соответствует лазерному воздействию с незначительным оплавлением поверхности).

3. Получаемая глубина закаленного слоя (150...170 мкм) достаточна для 3–5 переточек изношенного лезвия (при щадящих режимах заточки). Изменение свойств закаленного слоя по ширине на поверхности относительно невелико, поскольку малопротяженные (менее 80 мкм) переходные зоны, выходящие на поверхность, имеют незначительное падение твердости (HV = 657...767 кг/мм²). При переточках в определенных пределах их ширина будет меняться незначительно.

4. Результаты исследований позволяют рекомендовать использование разработанного режима лазерной термической обработки для упрочнения режущих кромок ножей рубительных машин при переработке сухостойной древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воскресенский С.А.* Резание древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 200 с.

2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 5-е изд. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
3. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
4. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
5. ГОСТ 23677–79. Твердомеры для металлов. Общие технические требования.
6. ГОСТ 17342–81. Ножи рубительных машин. Введ. М.: Изд-во стандартов, 1981.
7. Калинин Д.М. Режущий инструмент в деревообработке. М.: Гослестехиздат, 1935.
8. Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.
9. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. В.Н. Арзамасова. М.: Изд-во МГТУ, 2006. 637 с.

Поступила 16.01.14

UDC 674.093

Mode Selection of Laser Thermal Treatment of Chipping Machine Knives for Deadwood Processing

A.E. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor

A.I. Dumanskiy, Head of Laboratory

I.O. Dumanskiy, Candidate of Engineering, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: i.dumanskiy@agtu.ru

Deadwood shows high durability and hardness. It leads to considerable abrasive wear of chipper knife's edge during deadwood chip processing. In this case material requirements are the following: higher hardness of cutting edge (HRC 62...65 compared with traditional HRC 56...58) on retention of adequate dynamic strength. These characteristics are unachievable by selection of exclusive steel alloying or adjustment of traditional thermal treatment modes. Demanded characteristics can be obtained during laser thermal treatment of chipper knife's edge, by building up a special structural condition of steel. Laser thermal treatment adoption for chipper knife's alloy steel introduces many problems. Deficiency of scientific grounded laser thermal treatment modes is the major problem. Our investigation was focused on working out such modes. Conventional chipper knives made of 60Cr7WSiMoV steel were used for laser thermal treatment on laser beam machine "Kvant-15" during scientific investigation. Influence of radiation power on surface coating hardness and quantity of retained austenite in laser impingement point with internal radiation diameter was studied during scientific experiments. Radiation power was regulated by pumping condensers' charge voltage variation. Laser impingement points were arranged without overlapping during condensers' charge voltage variation in the range from 400 to 850 W at a pitch of 50 W, along with overlap ratio 0,5 and 0,75. Three factors were used for optimization: maximum hardness of steel in laser impingement point, minimum percentage (no more 5 %) of retained austenite in laser impingement point and minimum degree of reflowing. Optimal laser processing mode is the following: laser treatment with 3,0 mm diameter shots, 2 Hz pulse repetition frequency and 3 mm/s beam stroking speed. These characteristics provided

overlap ratio equal 0,5, with pumping condensers' charge voltage $U = 750-800$ W relevant to 5...6 J shot power. Optimal edge's structure with hardness HRC 63...64 and high dynamic strength is achieved thereby.

Keywords: deadwood, chipping machine, alloy steel, laser thermal treatment.

REFERENCES

1. Voskresenskiy S.A. *Rezanie drevesiny* [Wood Cutting]. Moscow, Leningrad, 1955. 200 p.
2. Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Instrumental Steels]. Moscow, 1983. 527 p.
3. *GOST 2999-75. Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vickersu* [State Standard 2999-75. Metals and Alloys. Vickers Hardness Test].
4. *GOST 9450-76. Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [State Standard 9450-76. Diamond-Pyramid Micro-Hardness Test].
5. *GOST 23677-79. Tverdomery dlya metallov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard 23677-79. Durometers for Metals. General Specifications].
6. *GOST 17342-81. Nozhi rubitel'nykh mashin* [State Standard 17342-81. Chipper Knives].
7. Kalinin D.M. *Rezhushchiy instrument v derevoobrabotke* [Cutting Tool in Wood-Processing]. Moscow, 1935.
8. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Wood-Processing Investigation]. Moscow, 1984. 232 p.
9. Arzamasov V.N. *Spravochnik po konstruksionnym materialam* [Construction Materials Guide Book]. Moscow, 2006. 637 p.

Received on January 16, 2014