

ТВЕРДЫЕ ТЕЛА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

УДК 621.685.616.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ УПРОЧНЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЯМ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2023 г. Э. Д. Ишкиняев^{a, b, *}, Е. В. Хриптович^{a, c}, В. Д. Воронов^{a, b},
В. Н. Петровский^b, И. Н. Шиганов^c

^aООО Научно-технического объединения “ИРЭ-Полюс”, Фрязино, 141195 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^cМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

*E-mail: ishkinyayev.emil@gmail.com

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 11.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Получение однородной закалки приповерхностной области на заданную глубину требует точного подбора и контроля параметров излучения в зависимости от геометрии и свойств детали. Так как лазерная закалка производится локально с пошаговой обработкой всей поверхности, аккумулированное тепло приводит к росту глубины закалки и оплавлению. Во избежание неравномерности по глубине необходимо варьировать технологические параметры в процессе обработки для поддержания стационарного нагрева материала. Экспериментальный подбор режимов обычно занимает чрезмерное количество времени и материальных ресурсов. В данной статье представлена методика математического моделирования процесса закалки высокоуглеродистой стали путем расчета температурных полей, индуцированных лазерным излучением. Граница зоны закалки определялась по изотерме, соответствующей критической температуре аустенизации в соответствии со скоростью охлаждения. Экспериментальная верификация модели проведена на инструментальных сталях с содержаниями углерода 0.7 и 1.2%. Показано влияние основных технологических параметров процесса обработки (мощность излучения, диаметр лазерного пятна, скорость обработки) на глубину и ширину зоны закалки. В работе также представлено применение построенной модели для подбора режимов многопроходной закалки на постоянную глубину без оплавления. Также рассмотрен эффект разупрочнения закаленной области вследствие повторного нагрева при многопроходной обработке.

Ключевые слова: лазерная закалка, теплопроводность, компьютерное моделирование, инструментальные стали, отпуск мартенсита

DOI: 10.56304/S2079562922050190

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерная закалка используется во многих областях промышленности от инструментальной до ядерной для повышения износостойкости деталей. Гибкость выбора технологических параметров лазерной обработки (мощность излучения, диаметр лазерного луча, скорость сканирования) позволяют выполнять закалку широкого круга материалов. Размеры ЗТВ определяются как характеристиками лазерного источника (длина волны, распределение плотности мощности, время воздействия) [1], геометрией изделия [2], так и физическими и оптическими свойствами обрабатываемых материалов (коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность, поглощательная способность). Для определения конечной микроструктуры материала также необходимо учитывать влияние предыдущих циклов термической и механической обработки [3].

Стали и чугуны являются основными материалами для лазерной термической обработки благодаря их хорошей прокаливаемости. При быстром нагреве области обработки до температур выше критической точки для преобразования исходной фазы в аустенит с последующим быстрым охлаждением в мартенсит происходит значительное повышение твердости в зоне воздействия [4].

Экспериментальный подбор режимов лазерной закалки является ресурсоемким процессом вследствие различной чувствительности конкретного материала к падающему излучению [5]. Даже если режимы однопроходной закалки были уже отработаны, параметры многопроходной закалки зависят от геометрии детали. Для получения равномерной глубины закалки без оплавления необходимо уменьшать подачу энергии на протяжении процесса лазерной обработки. Для ускорения

процесса поиска необходимого режима обработки целесообразно использовать моделирование, производя математический расчет температурных полей, индуцированных лазерным излучением. Зная температуру в каждой точке объема в любой момент времени, можно оценить конечную микроструктуру после обработки.

Существует целый ряд работ, направленных на математическое моделирование температурного распределения в процессе лазерной обработки [6–8]. В них используются различные методы для математического описания фазовых переходов во время нагрева и охлаждения. Закалка возможна при нагреве материала до температур между точками преобразования в фазу аустенита (A_{c1} – A_{c3}) и плавления (T_m). Для увеличения твердости материала при этом необходимо выполнение двух условий: (1) время удержания области при температуре выше A_{c3} должно быть достаточно для полной диффузии углерода в аустенит, и (2) скорость охлаждения должна быть достаточной для образования мартенсита [9]. Обычно оба эти условия выполняются во время лазерной закалки крупногабаритных деталей, в которых достигаются высокая скорость нагрева в области лазерного воздействия и достаточная скорость охлаждения вследствие самоохлаждения [9–11]. При этом для определения упрочненной зоны достаточно определить изотерму, соответствующую критической температуре A_{c3} , считая ее границей области закалки. Температуры A_{c1} и A_{c3} , соответствующие началу и концу преобразования в аустенит, в общем случае зависят от скорости нагрева. Известно, что при быстром лазерном нагреве данные критические температуры выше, чем при медленном нагреве в печи [12].

Разупрочнение твердых зон вследствие повторного нагрева при многопроходной обработке является основным ограничивающим фактором лазерной закалки. Авторы [13, 14] смоделировали эффект уменьшения твердости в перекрестной зоне при обработке двумя дорожками. Хотя они отмечают, что для получения равномерной закалки на заданную глубину необходимо варьировать технологические параметры для поддержания стационарного нагрева, никаких методик продемонстрировано не было.

В данной работе представлены методика моделирования и экспериментальная валидация процесса лазерной закалки инструментальных сталей с содержанием углерода 0.7 и 1.2%. Построенная модель была использована для расчета снижения мощности излучения при многопроходной обработке для избежания оплавления поверхности и поддержания стационарного режима нагрева.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование процесса лазерной обработки проводилось в среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Образцы для обработки имели форму пластин толщиной 18 мм. Грубая сетка с размерами элементов 0.5–7 мм была измельчена в области обработки до размеров $D/20$, где D – диаметр пятна лазерного луча. Результатом решения уравнения теплопередачи с заданными граничными условиями являются температурные поля в объеме всего образца. Размеры области закалки определялись изотермой, соответствующей температуре $(A_{c1} - A_{c3})/2$. Область, нагретая до температур A_{c1} – A_{c3} , считалась переходной зоной, в которой произошла неполная закалка и твердость падала до значений, свойственных исходному материалу.

2.1. Уравнение Теплопроводности

Распределение температурных полей в объеме материала, индуцированных лазерным излучением, определяется при решении уравнения Фурье (1).

$$C_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q(x, y), \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К); ρ – плотность, кг/м³; k – теплопроводность, Вт/(м К); $Q(x, y)$ – энергия лазерного излучения.

Граничные условия задаются конвекцией с воздухом и тепловым излучением, описываемым законом Стефана–Больцмана (2).

$$k(\nabla T n) = h(T_{amb} - T) + \epsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4), \quad (2)$$

где T_{amb} – температура окружающей среды, h – коэффициент конвекции, ϵ – излучательная способность поверхности, σ – константа Стефана–Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴)).

Лазерный нагрев моделировался как поверхностный движущийся со скоростью V [мм/с] источник тепла с гауссовым распределением плотности мощности $Q_L(x, y)$ с центром в начальной точке (x_0, y_0) (3).

$$Q_L = A(\lambda, T) \frac{2P}{\pi D^2} \times \exp\left(-8 \frac{(x - x_0 - Vt)^2 + (y - y_0)^2}{D^2}\right), \quad (3)$$

где $A(\lambda, T)$ определяют поглощенную долю энергии от лазерного источника, P – мощность излучения, Вт; D – диаметр пятна лазерного луча, мм.

2.2. Свойства Материала

Для корректного решения уравнения теплопроводности необходимо определить температурную зависимость плотности материала $\rho(T)$,

Таблица 1. Химический состав материалов

Материал	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %
У7А	0.65–0.74	0.17–0.33	0.17–0.28	<0.25	<0.2	<0.25
У12А	1.10–1.29	0.17–0.33	0.17–0.28	<0.25	<0.2	<0.25

теплопроводности $k(T)$, удельной теплоемкости $C_p(T)$ и коэффициента поглощения лазерного излучения соответствующей длины волны $A(\lambda, T)$.

Свойства материала были заданы на основе математического моделирования в соответствии с химическим составом в широком диапазоне температур с учетом фазовых переходов. Химический состав материалов представлен в табл. 1.

Поглощение поверхностью материала лазерной энергии на длине волны 1.07 мкм было установлено эмпирическим путем на основе данных из литературы [15]. Установлено, что небольшое изменение содержания углерода и состава сплава незначительно влияет на поглощательную способность материала. Большую роль играет качество поверхности.

Теоретический расчет коэффициента поглощения с необходимой точностью (например, по модели Брамсона через электрическое сопротивление) произвести невозможно вследствие большого количества влияющих на значение факторов (качество поверхности, степень оксидирования, температура нагрева, режимы обработки). Путем нескольких итераций моделирования и сопоставления полученных результатов с экспериментом, коэффициент поглощения был задан функцией $A(T)$ (4).

$$A(T) = \begin{cases} 0.00055T + 0.1, & T < 1000 \text{ К}, \\ 0.65, & T > 1000 \text{ К}. \end{cases} \quad (4)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

При решении уравнения Фурье были получены температурные поля по всему объему материала (рис. 1б). По полученным температурным полям были определены изотермы, соответствующие точке плавления T_m и критическим температурам A_{c1} и A_{c3} сталей. Они показывают границы зоны проплавления и закалки соответственно (рис. 1в). Также в качестве решения выводятся температурные зависимости в точках на периферии области воздействия (отстоящих на 5–10 мм от центра лазерного пятна в зависимости от режима обработки) для последующего сравнения расчетных и экспериментально измеренных с использованием тепловизора данных (рис. 1г).

Экспериментальная часть проводилась на установке, оборудованной высокомоушным волоконным лазером до 10 кВт на длине волны 1070 нм производства IPG Photonics. Лазерная закалка отшлифованных подложек из сталей У7А и У12А

толщиной 18 мм производилась путем нанесения единичных линий при трех значениях скорости движения луча V , соответствующих разной степени производительности – 10, 20 и 30 мм/с. Изменение диаметра пятна производилось уходом в больший расфокус. В рамках данной работы были выбраны следующие значения диаметра D – 3, 7, 11, 15 и 20 мм. Для каждой комбинации вышеперечисленных параметров V и D подбирались 4–5 значений мощности излучения P для закалки на различную глубину без оплавления и изменения морфологии поверхности.

Экспериментальная верификация модели производилась сравнением: (1) температурных зависимостей нагрева и охлаждения подложки в выбранных точках, снятых с использованием тепловизора, и (2) характерных размеров зоны закалки (ширина и глубина). Для корректного измерения температур на подложку клеилась лента Kapton с коэффициентом излучения, близким к единице. Таким образом исключалась возможность ошибки измерения температуры из-за низкого коэффициента излучения шлифованной стальной поверхности и его изменения вследствие оксидации в процессе обработки. Размеры зоны закалки определялись прямым наблюдением под оптическим микроскопом отполированных и протравленных в 20% азотной кислоте шлифов. Пример графиков температур и фотография макрошлифа показаны на рис. 2.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений глубины зоны закалки удобно представить на графике в виде зависимости от параметра $P/(VD)$ [Дж/см²], имеющего размерность плотности энергии. Такое представление позволит объединить множество режимов с различной мощностью излучения, скоростью движения луча и диаметром лазерного пятна в одну переменную (рис. 3).

Анализируя результаты обработки при различных скоростях, было установлено, что глубина закалки линейно пропорциональна параметру P/VD при фиксированной скорости V . Изменение скорости вносит нелинейный характер в зависимость.

Модель предсказывает глубину закалки с точностью ~90% в широком диапазоне технологических параметров обработки за исключением нескольких режимов с диаметрами пятна 15 и 20 мм. Расхождения с расчетами объясняются неточным описанием профиля интенсивности лазерного луча. В данной работе лазерный луч моделировался как поверхностный источник тепла с Гауссовым

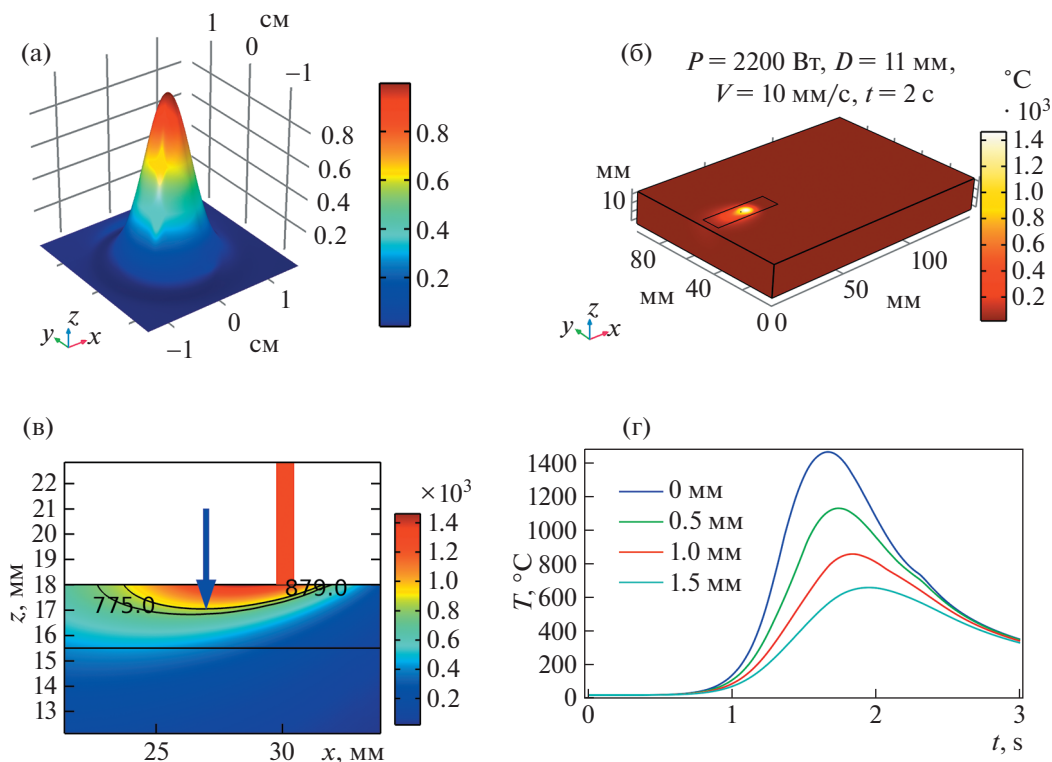


Рис. 1. Пример результатов моделирования: (а) распределение плотности мощности излучения с диаметром пятна 11 мм; (б) температурные поля во время обработки; (в) поперечное сечение с изотермами, соответствующими температурам As_1 и As_3 (красная линия показывает центр лазерного луча, синяя стрелка — максимальную глубину закалки); (г) графики температур в характерных точках на различных расстояниях от поверхности обработки.

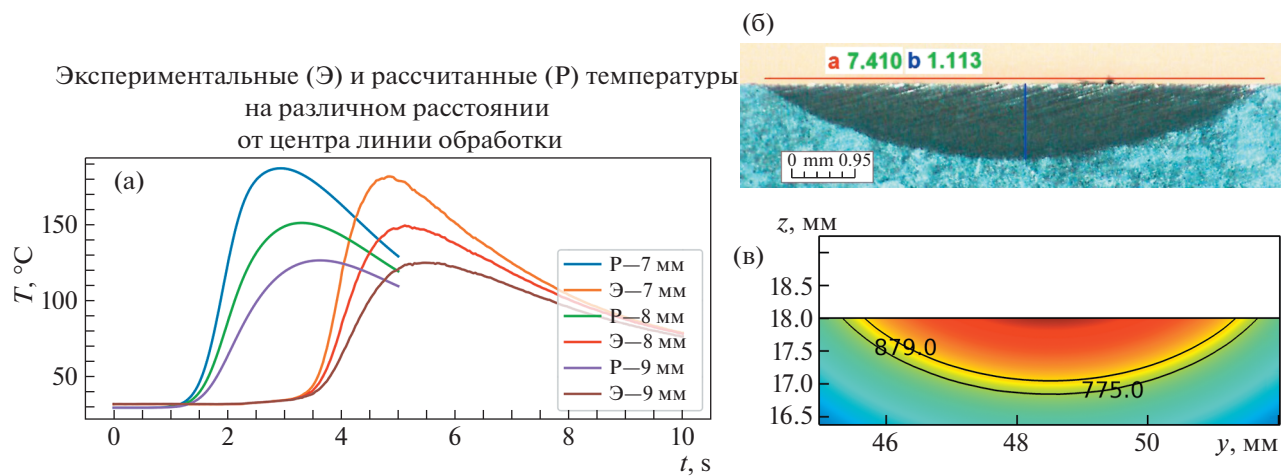


Рис. 2. Графики температур на периферии области обработки (а), фотография поперечного сечения с темной областью закалки после обработки на режиме $P = 2200$ Вт, $V = 10$ мм/с, $D = 11$ мм (б) и соответствующее поперечное сечение с рассчитанным тепловым полем (в).

распределением плотности мощности. Это представление корректно только для одномодовых лазеров с параметром качества луча M^2 близким к единице. Для многомодовых лазеров, у которых $M^2 \gg 1$, распределение интенсивности несколько отличается от Гауссовой функции.

Для закалки поверхности детали с размерами больше ширины лазерного пятна используется сканирование заданной области несколькими одиночными линиями с перекрытием. При такой многопроходной закалке существует необходимость варьирования технологических параметров

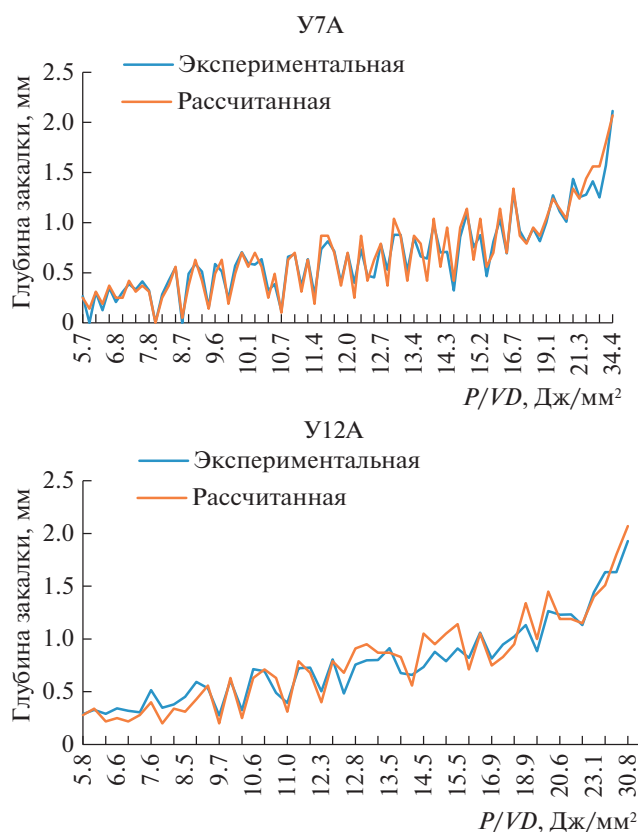


Рис. 3. Зависимость рассчитанной и экспериментальной глубин закалки от параметра P/VD в широком диапазоне технологических режимов лазерной обработки сталей У7А и У12А.

для получения упрочненного слоя с постоянной глубиной. Если не уменьшать подачу энергии, то глубина закалки будет расти, и в конечном счете поверхность начнет плавиться. Значения варьирования зависят от режима обработки, геометрии детали и внешних условий. Верифицированная модель помогает подобрать режимы и их изменение со временем для получения закалки заданной глубины на конкретной детали, значительно уменьшая количество необходимых экспериментальных работ.

На основе математической модели были рассчитаны режимы для многопроходной обработки стали

У7А. Уменьшение подаваемой лазерной энергии производилось снижением мощности излучения. С первой попытки была получена равномерная закалка на глубину 1.3–1.4 мм при обработке на скорости 10 мм/с с диаметром пятна 11 мм, и 1.45–1.55 мм с диаметром пятна 15 мм. На рис. 4 показаны поперечные шлифы после обработки на соответствующих режимах.

Первая дорожка всегда имеет наименьшую глубину закалки, поскольку излучение падает на отполированную, хорошо отражающую поверхность. При обработке последующих линий часть излучения падает на оксидированную поверхность с высоким коэффициентом поглощения. Большее поглощение энергии приводит к увеличению глубины закалки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов однократной обработки на различных скоростях V показал, что глубина закалки линейно пропорциональна параметру P/VD на фиксированных скоростях сканирования V . Изменение V вносит нелинейность в зависимость. Увеличение скорости обработки приводит к снижению максимальной глубины закалки без оплавления для всех диаметров пятна (максимальная глубина закалки на скорости 10 мм/с составляет 1.57 мм, на 20 мм/с – 1.44 мм, на 30 мм/с – 1.09 мм и почти столько же для У12А). Увеличение диаметра пятна приводит к увеличению максимальных значений ширины и глубины закалки без оплавления на всех скоростях обработки, а также к увеличению переходной зоны с уменьшенной твердостью. Изменения микротвердости в области упрочнения при изменении скорости обработки и диаметра пятна выявлено не было. Для У7А микротвердость материала в зоне с мартенситной структурой составляет 800–900 HV0.1 и снижается в переходной зоне, где температура нагрева была меньше A_{c3} и больше A_{c1} (775 и 880°C для скоростей нагрева выше 100°C/с) до 200–250 HV0.1, что соответствует твердости основного металла. Твердость стали У12А в мартенситной зоне составляет 750–850 HV0.1.

Микроструктура ЗТВ в приповерхностной области после многопроходной обработки с изме-

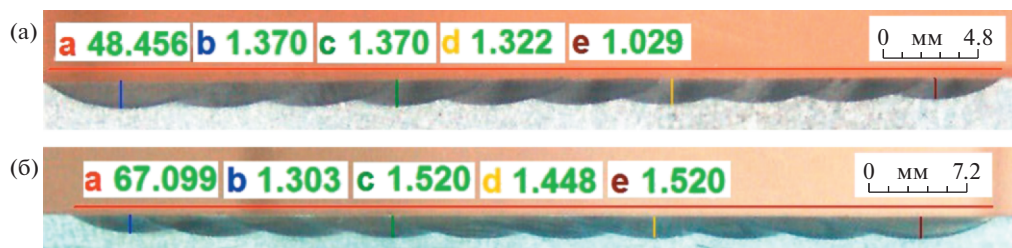


Рис. 4. Результат закалки с переменной мощностью. (а) $D = 11$ мм (б) $D = 15$ мм.

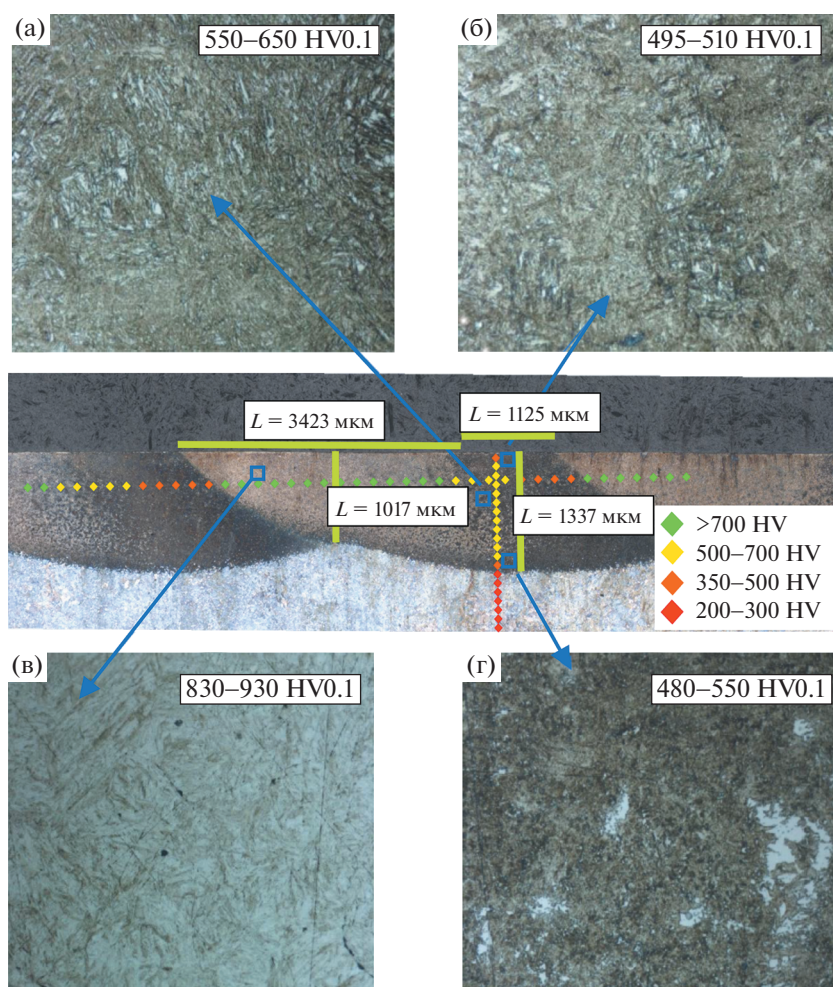


Рис. 5. Микроструктура и микротвердость в ЗТВ после многопроходной обработки.

ренной в нескольких точках микротвердостью показана на рис. 5. Твердость материала после лазерной обработки увеличилась с ~ 250 HV0.1 до ~ 850 HV0.1. Но из-за эффекта разупрочнения микротвердость снижается примерно до половины от максимального значения в областях, повторно нагретых ниже температуры аустенизации. Микроструктура закаленной зоны (рис. 5в), которая не подвергалась повторному нагреву, в основном состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Микротвердость в данной области составляет 830–930 HV0.1. Микроструктура закаленных областей (рис. 5а, 5б), подвергнутых повторному нагреву до температур 300–400°C, состоит преимущественно из отпущенного мартенсита и характеризуется микротвердостью 500–650 HV0.1. Переходная область (рис. 5г), характеризуется низкими значениями микротвердости 480–550 HV0.1. В этом случае структурно-фазовый состав в основном представлен трооститом, а также содержит малое количество мартенсита и характеризуется наличием

ферритных областей, что свидетельствует о нагреве этой области до температур неполной закалки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была построена модель теплопередачи при лазерной закалке высокоуглеродистых сталей для расчета температурных полей и размеров зоны закалки. Модель с высокой точностью предсказывает глубину и ширину упрочненного слоя по критической температуре аустенизации в широком диапазоне технологических параметров процесса лазерной закалки. Установлено, что с повышением скорости движения лазерного луча, максимальная возможная глубина закалки без оплавления уменьшается.

На основе полученной модели были рассчитаны значения варьирования подаваемой лазерной энергии при многополосной обработке для получения закалки с постоянной глубиной. Экспериментальная обработка 10 линиями с перекрытием 33% с рассчитанными технологическими пара-

метрами для закалки приповерхностного слоя на глубину, превышающую 1.3 мм, полностью подтверждает результаты расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Klocke F., Schulz M., Gräfe S. // *Coatings*. 2017. V. 7 (6). P. 77.
<https://doi.org/10.3390/coatings7060077>
2. Ogawa K. et al. // *Adv. Mater. Process. Technol.* 2019. V. 5 (3). P. 379–385.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1614360>
3. Mole N. et al. // *Metals (Basel)*. 2018. V. 8 (12). P. 1016.
<https://doi.org/10.3390/met8121016>
4. Marimuthu P. // *Emerg. Mater. Res.* 2019. V. 8 (2). P. 188–205.
<https://doi.org/10.1680/jemmr.16.00145>
5. Barka N. et al. // *Coatings*. 2020. V. 10 (4). P. 342.
<https://doi.org/10.3390/coatings10040342>
6. Bailey N.S., Tan W., Shin Y.C. // *Surf. Coat. Technol.* 2009. V. 203 (14). P. 2003–2012.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039>
7. Orazi L. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2010. V. 256 (6). P. 1913–1919.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.10.037>
8. Yaakoubi M., Kchaou M., Dammak F. // *Comput. Mater. Sci.* V. 68. P. 297–306.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.10.001>
9. Ki H., So S. // *Opt. Laser Technol.* 2012. V. 44 (7). P. 2106–2114.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.018>
10. Patwa R., Shin Y.C. // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2007. V. 47 (2). P. 307–320.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.016>
11. Orazi L., Rota A., Reggiani B. // *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 2021. V. 16 (1). P. 1.
<https://doi.org/10.1186/s40712-020-00124-0>
12. Bojinović M., Mole N., Štok B. // *Surf. Coatings Technol.* 2015. V. 273 (1). P. 60–76.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.075>
13. Lakhkar R.S., Shin Y.C., Krane M.J.M. // *Mater. Sci. Eng. A*. 2008. V. 480 (1–2). P. 209–217.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.054>
14. Giorleo L., Previtali B., Semeraro Q. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011. V. 54 (9–12). P. 969–977.
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-3008-5>
15. Indhu R. et al. // *Lasers Manuf. Mater. Process.* 2018. V. 5 (4). P. 458–481.
<https://doi.org/10.1007/s40516-018-0075-1>

Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields During Laser Processing

E. D. Ishkinyayev^{1, 2, *}, E. V. Khriptovich^{1, 3}, V. D. Voronov^{1, 2}, V. N. Petrovskiy², and I. N. Shiganov³

¹IPG IRE-Polus, Fryazino, 141195 Russia

²National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

*e-mail: ishkinyayev.emil@gmail.com

Received July 11, 2022; revised July 11, 2022; accepted July 18, 2022

Abstract—Obtaining a uniform hardening of the near-surface area to a given depth requires precise selection and control of laser radiation parameters, depending on the part geometry and its properties. Since laser irradiation is performed locally with step-by-step processing of the entire surface, the accumulated heat leads to an increase in the hardening depth and surface melting. In order to avoid depth unevenness, it is necessary to vary laser energy supply during processing to maintain a stationary heating of the material. Experimental selection of technological parameters usually takes an excessive amount of time and material resources. This article presents a technique of mathematical modeling of the high-carbon tool steels hardening process by calculating the temperature fields induced by laser radiation. The boundary of the hardening zone was determined as the isotherm of the corresponding austenitizing critical temperature in accordance with the heating rate. Experimental verification of the model was carried out on tool steels with carbon content of 0.7% and 1.2%. The influence of the main processing technological parameters (radiation power, laser spot diameter and scanning speed) on the hardening zone size is shown. The paper also presents the use of the built model for selection of the technological parameters of multi-track treatment to harden material to a constant depth without surface melting. The effect of back tempering in overlapped regions is also considered.

Keywords: laser hardening, heat transfer, computer modeling, tool steels, back tempering