



*Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський, В. Л. Юрчук, Н. О. Меранова, Н. П. Полозенко*

*Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПОЛИАРГУМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Для условий закалки режущего инструмента лучом лазера исследованы закономерности изменения пороговых значений технологических параметров, разделяющих их благоприятные и недопустимые величины. Приведено описание основных положений методов полиаргументных систем, используемых при определении указанных пороговых значений, а именно, положения о необходимости исключения из искомого решения каких-либо априорных элементов, положения о реализации полноты функционального отображения искомой информации в редуцированной задаче, а также положения о редукции многомерной задачи к особым одномерным задачам. Выявлены особенности поведения пороговых значений технологических параметров применительно к трем отрицательным ситуациям, наблюдаемым в практике закалки режущего инструмента: 1) проплавление собственно режущей кромки; 2) проплавление некоторой зоны, прилегающей к обрабатываемой поверхности и расположенной на удалении от режущей кромки; 3) отрыв упрочненной зоны от режущей кромки (т.е. в этом случае собственно режущая кромка оказывается неупрочненной). Для данных ситуаций получены зависимости пороговых значений скорости движения лазерного луча от расстояния между режущей кромкой и центром луча при различных величинах угла заточки инструмента. Выполнена интерпретация полученных зависимостей на основе анализа действия различных, в том числе и конкурирующих факторов. Сделан вывод о том, что найденные пороговые значения должны служить основой роектирования технологического процесса закалки режущего инструмента.

**Ключевые слова:** закалка лучом лазера; математическое моделирование; процессы теплопереноса; режущий инструмент.

**Введение.** Лазер как технологический инструмент широко используется для закалки деталей во многих отраслях промышленности. Исследованию различных аспектов технологии лазерной закалки посвящен целый ряд работ, в которых рассматриваются актуальные вопросы развития данной технологии. Так, в (Idan Alaa Fadhil et al., 2016a, 2016b; Colombini et al., 2015; Lobankova et al., 2016; Monisha et al., 2017; Lesyk et al., 2017; Veronesi et al., 2017; Sato et al., 2016) представлены результаты исследований, касающихся режимов лазерной закалки, а также структуры и свойств упрочненных деталей. Большое внимание уделяется использованию при лазерной закалке сканирующей оптики (Klocke et al., 2017; Ruetering, 2016; Sancho et al., 2018; Martinez et

al., 2016a, 2016b, 2017). Анализируются особенности рассматриваемой технологии при упрочнении деталей различной конфигурации (Sato et al., 2016). Рассматриваются закономерности комбинированного воздействия на материалы луча лазера и ультразвуковой ударной обработки (Lesyk et al., 2015, 2017).

Обращает на себя внимание тот факт, что вопросам исследования теплового состояния деталей в процессе лазерной закалки уделяется недостаточное внимание (Martinez et al., 2016a, 2017). Хотя именно тепловые процессы в большой мере определяют характер протекания сопутствующих им явлений и окончательный результат воздействия лазерного луча на вещество.

Настоящая работа посвящена исследованию с ис-

### Інформація про авторів:

**Фіалко Наталія Михайлівна**, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [nmfialko@ukr.net](mailto:nmfialko@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

**Прокопов Віктор Григорович**, д-р техн. наук, професор, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [nmfialko@ukr.net](mailto:nmfialko@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-9026-8742>

**Шеренковський Юлій Владиславович**, канд. техн. наук, ст. наук співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [j\\_sher@ukr.net](mailto:j_sher@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0003-1765-7319>

**Юрчук Володимир Леонідович**, канд. техн. наук, ст. наук співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [vyur1@ukr.net](mailto:vyur1@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0003-2718-7568>

**Меранова Наталія Олегівна**, канд. техн. наук, ст. наук співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [mnata1956@ukr.net](mailto:mnata1956@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0001-7223-8753>

**Полозенко Ніна Петрівна**, канд. техн. наук, ст. наук співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: [nina\\_polozenko@ukr.net](mailto:nina_polozenko@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-0272-5385>

**Цитування за ДСТУ:** Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковський Ю. В., Юрчук В. Л., Меранова Н. О., Полозенко Н. П. Определение пороговых значений технологических параметров лазерного упрочнения на основе методов полиаргументных систем. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 6. С. 92–97.

**Citation APA:** Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Sherenkovskiy, Ju. V., Yurchuk, V. L., Meranova, N. O., & Polozenko, N. P. (2019). Determination of threshold values of technological parameters of laser hardening on the basis of polyargument systems methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(6), 92–97. <https://doi.org/10.15421/40290619>

пользованием математического моделирования теплового состояния режущего инструмента в процессе его лазерной закалки и определению на этой основе пороговых допустимых значений технологических параметров.

**Материалы и методы исследования.** В настоящей работе рассматриваются вопросы, касающиеся упрочнения режущего инструмента лучом лазера. Исследования базируются на анализе температурного режима инструмента в процессе его закалки. Теплофизическая постановка задачи для рассматриваемой ситуации формулируется следующим образом. По поверхности инструмента движется параллельно оси  $z$  на некотором расстоянии от нее нормально распределенный источник лазерного нагрева с постоянной скоростью  $V$  (рис. 1). Рассматривается ситуация, отвечающая неизменным условиям теплообмена детали с окружающей средой, которые описываются законом Ньютона-Рихмана. Температура окружающей среды  $t_c$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  принимаются постоянными и одинаковыми для всех ограничивающих поверхностей. Величины плотности подводимого теплового потока  $q_{max}$ , радиуса пятна нагрева  $r_{0p}$ , температуры окружающей среды  $t_c$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  полагаются постоянными ( $q_{max} = 4,78 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $r_{0p} = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_c = 20$  °С;  $\alpha = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>К). В качестве материала инструмента рассматривалась сталь У8. Определению подлежат пороговые значения скорости движения лазерного луча  $V_n$  в зависимости от расстояния между режущей кромкой и центром пятна нагрева.

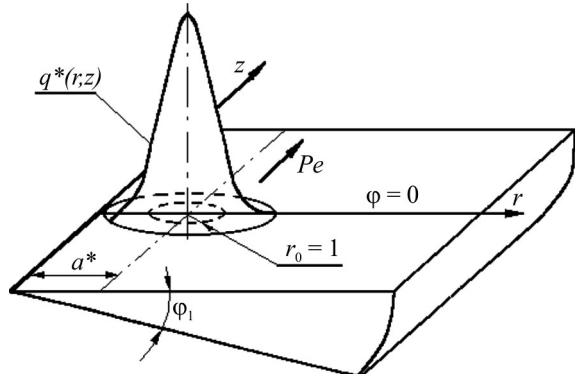


Рис. 1. К постановке задачи

Указанное определение пороговых значений скорости  $V_n$  осуществлялось в результате решения трехмерной квазистационарной задачи теплопереноса, постановка которой представима в виде:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Pe \cdot C_V \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} - Bi \cdot \theta \Big|_{r=r_{0p}} = 0, \quad (2)$$

$$\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} + Bi \cdot \theta \Big|_{r=r} = 0, \quad (3)$$

$$\Lambda \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \phi} - Bi \cdot \theta \Big|_{\phi=0} = -\exp \left[ -z^2 - (r - a^*)^2 \right], \quad (4)$$

$$\Lambda \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \phi} + Bi \cdot \theta \Big|_{\phi=\phi_1} = 0, \quad (5)$$

$$\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=\pm\infty} = 0, \quad (6)$$

где:  $\theta = (t - t_c) \lambda_0 / (q_{max} \cdot r_{0p})$ ;  $Pe = V \cdot r_{0p} / a_0$ ;  $Bi = \alpha \cdot r_{0p} / \lambda_0$ ;  $r = r_p / r_{0p}$ ;  $r_u = r_{pu} / r_{0p}$ ;  $r_e = r_{pe} / r_{0p}$ ;  $a^* = a_p^* / r_{0p}$ ;  $Z = z_p / z_0$ ;

$\Lambda = \lambda / \lambda_0 C_V = c_V / c_{V_0}$ ;  $a_0 = \lambda_0 / c_{V_0}$ ;  $q_{max}$  – максимальное значение эпюры теплоподвода;  $t_c$  – температура среды;  $V$  – скорость движения лазерного луча;  $r_{0p}$  – радиус пятна нагрева;  $r_{pe}$ ,  $r_{pu}$  – внутренний и наружный радиус детали;  $a_p^*$  – расстояние от режущей кромки до местоположения максимума теплоподвода;  $\phi_1$  – угол заточки инструмента;  $\lambda_0$ ,  $c_{V_0}$  – фиксированные значения коэффициента теплопроводности и удельной объемной теплоемкости материала соответственно.

Задача (1)-(6) решалась с использованием метода полиаргументных систем (МПС), ориентированных на решение многомерных задач переноса (Прокопов и др., 1986; Прокопов, 2010). Данный класс методов может интерпретироваться как логическое обобщение и развитие проекционных методов – одного из наиболее важных подходов современной вычислительной математики.

Основой построения методов полиаргументных систем служат следующие три положения.

Первое положение можно сформулировать как стремление исключить необходимость использования в искомом решении каких-либо априорных элементов и определить всю требуемую для построения решения информацию в максимально возможной мере, исходя только из заданной математической постановки задачи. Априорными элементами, об исключении которых идет речь, в отмеченных выше базисных методах являются прежде всего базисные функции, а также некоторые дополнительные функции, обеспечивающие удовлетворение граничным условиям, учет формы области и т.п.

Второе положение представляет собой важнейшую концепцию построения данного класса методов – концепцию полноты функционального отражения. Сущность этой концепции может быть сформулирована как некоторое требование к особенностям отражения исходной информации в редуцированной постановке. Согласно этому требованию необходимо иметь возможность в процессе редукции информацию, фигурирующую в исходной математической модели в функциональном виде, отразить в редуцированной постановке также в функциональном виде, т.е. в виде функций того или иного аргумента. Причем самой спецификой построения методов должна быть обеспечена возможность осуществления такого функционального отражения как частично, так и (что особенно важно) с максимально возможной полнотой, допускаемой принимаемыми ограничениями.

Третье положение характеризует основное ограничение, в рамках которого реализуется два предшествующих положения. В данной работе таким ограничением является сведение исходной многомерной задачи к особым одномерным, т.е. к задачам, формулируемым в конечном итоге для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Принятие этого условия мотивировано преимущественно следующими двумя соображениями. Во-первых, необходимостью иметь хорошо разработанный математический аппарат, который может быть эффективно применен к решению редуцированной задачи. И, во-вторых, возможностью отразить в редуцированной постановке исходную функциональную информацию именно в функциональном виде, как того требует указанная выше концепция.



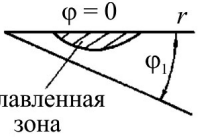
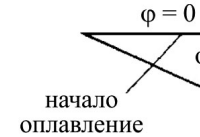


Изложенные выше три положения, лежащие в основе построения методов полиаргументных систем, и

прежде всего концепция полноты функционального отражения, обеспечивают высокую эффективность разрабатываемого подхода при решении различных многомерных задач переноса.

**Результаты исследования.** Как показала практика закалки режущего инструмента, в случае реализации недостаточно рациональных технологических режимов могут иметь место следующие типичные отрицательные ситуации:

- 1) проплавление собственно режущей кромки;
- 2) проплавление некоторой зоны, прилегающей к обрабатываемой поверхности и расположенной на удалении от режущей кромки;
- 3) отрыв упрочненной зоны от режущей кромки (т.е. в этом случае собственно режущая кромка оказывается неупрочненной).

Таким образом, к общим требованиям в части обеспечения необходимых уровней температур и скоростей охлаждения применительно к закалке режущего инструмента следует добавить также требование отсутствия перечисленных отрицательных явлений. То есть необходимо, чтобы, во-первых, в процессе лазерной закалки отсутствовало проплавление как собственно режущей кромки, так и обрабатываемой поверхности инструмента. (Необходимость соблюдения этого требования обусловлена тем обстоятельством, что процесс лазерного упрочнения, являясь одной из завершающих операций технологии изготовления режущего инструмента, не должен вносить сколько-нибудь значительных изменений в конфигурацию инструмента, что, однако, как очевидно, возможно при наличии проплавления последнего). И во-вторых, требуется, чтобы упрочненная зона не отстояла от собственно режущей кромки.

Отрицательные ситуации	Предельные случаи
 <p>а) оплавленная зона</p>	 <p>начало оплавление</p>
 <p>б) оплавленная зона</p>	 <p>начало оплавление</p>
 <p>в) упрочненная зона</p>	 <p>упрочненная зона</p>

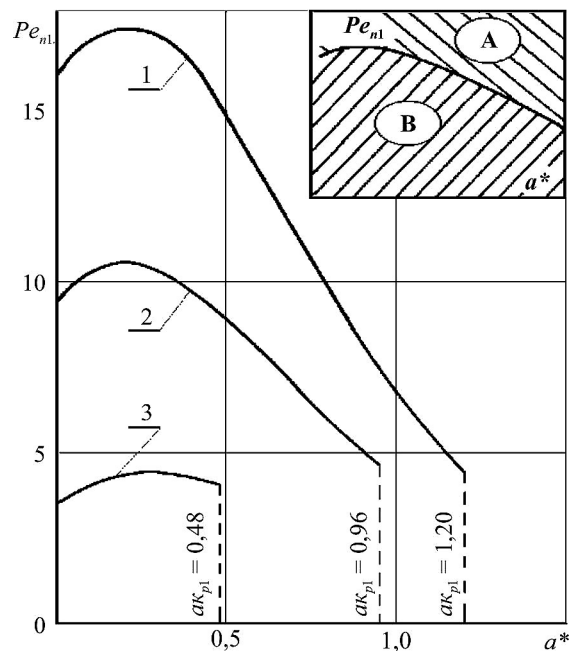
**Рис. 2.** Характерные отрицательные ситуации, наблюдаемые в практике лазерной закалки режущего инструмента, и соответствующие предельные случаи: а) оплавление собственно режущей кромки; б) оплавление зоны, прилегающей к обрабатываемой поверхности и расположенной на некотором удалении от режущей кромки; в) отрыв упрочненной зоны от режущей кромки

Для каждой из трех отмеченных отрицательных ситуаций можно указать некоторый предельный случай, разграничивающий области допустимых и недопустимых значений технологических параметров. Применительно к первой ситуации такой предельный случай соответствует собственно началу проплавления режущей кромки (рис. 2,а), для второй ситуации – началу проплавления зоны, прилегающей к обрабатываемой по-

верхности и отстоящей от собственно кромки (см. рис. 2,б). Что же касается третьей ситуации, то здесь предельный случай отвечает такому расположению упрочненной зоны, когда ее граница непосредственно совпадает с режущей кромкой (см. рис. 2,в). Назовем значения технологических параметров, соответствующие указанным предельным случаям пороговыми. При этом пороговые значения, отвечающие первой, второй и третьей ситуациям, называются соответственно первыми, вторыми и третьими пороговыми значениями.

Приводимый ниже материал касается нахождения на основе решения задачи (1)-(6) указанных пороговых значений, поскольку, как очевидно, знание закономерностей их изменения представляет значительный интерес для технологической практики лазерной закалки.

Остановимся вначале на рассмотрении закономерностей изменения первой пороговой скорости  $V_{n1}$  (числа  $Pe_{n1}$ ). Соответствующие данные проведенных численных исследований представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость первого порогового числа  $Pe_{n1}$  от расстояния  $a^*$  между режущей кромкой и центром пятна нагрева при радиусе пятна нагрева  $r_0 = 1,0$  для различных углов заточки режущего инструмента  $\varphi_1$ : 1 –  $\varphi_1 = \pi/4$ ; 2 –  $\varphi_1 = \pi/3$ ; 3 –  $\varphi_1 = \pi/2$ . А – зона отсутствия оплавленной кромки; В – зона оплавления кромки

Как видно, зависимость значений первого порогового значения числа Пекле  $Pe_{n1}$  от безразмерного расстояния между  $a^*$  ( $a^* = a_p^* / r_{0p}$ ) между режущей кромкой и центром пятна нагрева носит экстремальный характер. Наличие максимума здесь обусловлено действием двух конкурирующих факторов: во-первых, величины общего подводимого к инструменту теплового потока  $Q$ , и, во-вторых, условий теплоперетоков в детали. С увеличением значений  $a^*$  общий тепловой поток  $Q$  возрастает, что приводит к определенному повышению температурного уровня инструмента и, следовательно, к росту значений первого порогового числа  $Pe_{n1}$ . Однако, с другой стороны возрастание  $a^*$  сопровождается улучшением условий для оттоков теплоты от пятна нагрева. Это, напротив, обуславливает снижение температуры в высокотемпературной зоне, и соответственно, падение

величины скорости  $V_{n1}$ . Согласно результатам проведенных вычислительных экспериментов в области малых значений  $a^*$  доминирующим оказывается действие первого фактора, при сравнительно больших  $a^*$  – второго из них.

Важно отметить, что в области больших значений  $a^*$  имеет место следующая особенность поведения величины  $Pe_{n1}$ . Как показали данные выполненных численных исследований, начиная с некоторого значения  $a^*$  (назовем его  $a_{кр1}^*$ ) ни при какой величине скорости перемещения лазерного луча проплавление собственно режущей кромки не происходит (см. рис. 3). Для всех  $a^* \geq a_{кр1}^*$  может наблюдаться только проплавление участка обрабатываемой поверхности, расположенного на некотором удалении от кромки.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что величина первой пороговой скорости движения лазерного луча  $V_{n1}$  существенно зависит от угла заточки режущего инструмента  $\varphi_1$ . Как видно из рис. 3, чем больше угол заточки  $\varphi_1$ , тем меньше, при прочих равных условиях, значения порогового числа Пекле  $Pe_{n1}$ . Обращает на себя внимание также тот факт, что диапазон изменения величины порогового числа  $Pe_{n1}$  при разных углах заточки инструмента  $\varphi_1$  оказывается существенно различным; с ростом  $\varphi_1$  этот диапазон сужается (см. рис. 3). Что же касается величины  $a_{кр1}^*$ , то она заметно уменьшается при увеличении угла заточки  $\varphi_1$ . Так, если для  $\varphi_1 = \pi/4$ , значение  $a_{кр1}^* = 1,2$ , то при  $\varphi_1 = \pi/2$  оно составляет только 0,48. Важно также подчеркнуть, что первые пороговые скорости, отвечающие расстоянию  $a_{кр1}^*$ , для разных углов заточки  $\varphi_1$  являются весьма близкими по величине.

Рассмотрим вкратце особенности поведения второй пороговой скорости  $V_{n2}$  (числа Пекле  $Pe_{n2}$ ). Типичные результаты проведенных численных исследований иллюстрирует рис. 4.

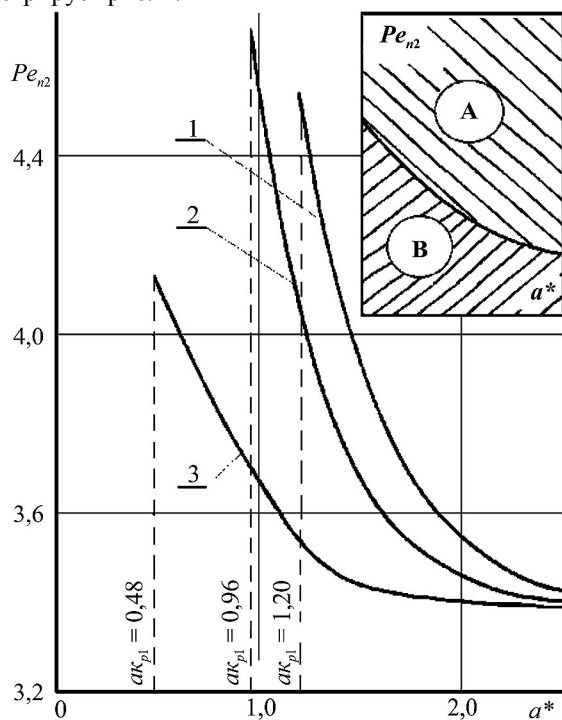


Рис. 4. Зависимость второго порогового числа Пекле  $Pe_{n2}$  от расстояния  $a^*$  между режущей кромкой и центром пятна нагрева

ва при радиусе пятна нагрева  $r_0 = 1,0$  для различных углов заточки режущего инструмента  $\varphi_1$ : 1 –  $\varphi_1 = \pi/4$ ; 2 –  $\varphi_1 = \pi/3$ ; 3 –  $\varphi_1 = \pi/2$ . А – зона отсутствия оплавления обрабатываемой поверхности; В – зона оплавления обрабатываемой поверхности

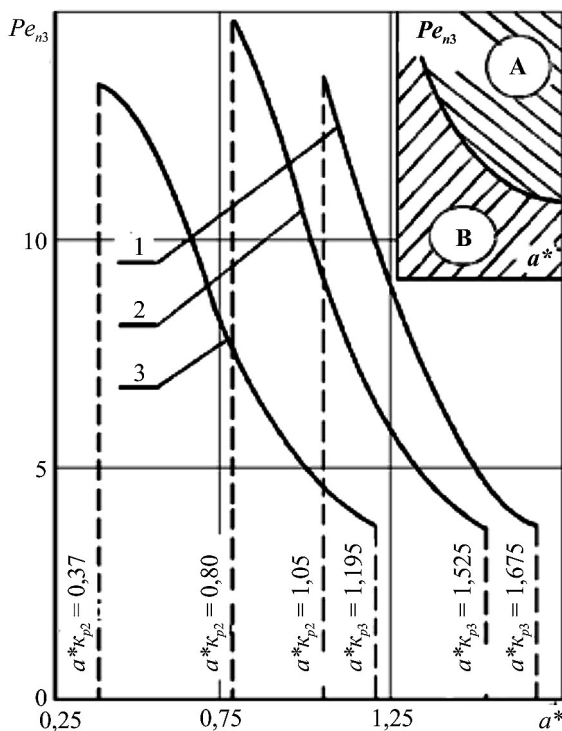
Здесь в первую очередь следует отметить, что ситуация проплавления зоны, удаленной от режущей кромки, реализуется, как уже отмечалось, лишь при достаточно больших величинах  $a^*$ , превышающих  $a_{кр1}^*$ . При этом с ростом  $a^*$ , начиная с величины  $a_{кр1}^*$ , наблюдается падение второго порогового числа Пекле  $Pe_{n2}$ . Однако, при сравнительно больших  $a^*$  скорость изменения числа  $Pe_{n2}$  (т.е. величины  $\partial Pe / \partial a^*$ ) уменьшается, так что при достижении определенных значений  $a^*$  (различных для разных углов заточки инструмента) изменение величины  $Pe_{n2}$  оказывается практически неощутимым. Это обстоятельство, очевидно, объясняется проявлением в рассматриваемой физической обстановке эффекта регионального влияния необогреваемой поверхности инструмента. Действительно, с ростом  $a^*$  ситуация, наблюдаемая в высокотемпературной зоне, все в большей мере приближается к условиям нагрева полубесконечного массива и, следовательно, зависимость величины  $Pe_{n2}$  от расстояния  $a^*$  здесь практически отсутствует. Согласно полученным данным, значения  $a^*$ , отвечающие началу описанной стабилизации величины  $Pe_{n2}$ , оказываются тем большими, чем меньшими, при прочих равных условиях, являются углы заточки режущего инструмента  $\varphi_1$ .

Перейдем далее к анализу закономерностей изменения третьей пороговой скорости  $V_{n3}$  (числа Пекле  $Pe_{n3}$ ). Здесь вначале необходимо уточнить введенное ранее понятие третьего порогового значения скорости перемещения лазерного луча  $V_{n3}$ . Как отмечалось выше, это значение скорости разграничивает области наличия и отсутствия отрыва упрочненной зоны от собственно режущей кромки. При этом для данного значения скорости, очевидно, должно выполняться и требование отсутствия проплавления обрабатываемой поверхности инструмента. Иначе говоря, третье пороговое значение скорости  $V_{n3}$  разделяет области наличия и отсутствия отрыва упрочненной зоны от кромки в условиях, когда проплавление этой зоны не имеет места.

Характерные результаты проведенных вычислительных экспериментов приведены на рис. 5. Как следует из полученных данных, отрыв упрочненной зоны от режущей кромки может происходить только, начиная с некоторого значения величины  $a^*$  (назовем его  $a_{кр2}^*$ ). При этом значение  $a_{кр2}^*$  оказывается различным для разных углов заточки инструмента  $\varphi_1$ . Меньшим углам  $\varphi_1$  отвечают большие величины  $a_{кр2}^*$ . Так,  $a_{кр2}^* = 0,37$  при  $\varphi_1 = \pi/2$ , и составляет 1,05 для  $\varphi_1 = \pi/4$ .

Что же касается характера зависимости  $Pe_{n3} = f(a^*)$ , то, как видно из рис. 5, для всех рассмотренных значений  $\varphi_1$  наблюдается монотонное падение величины  $Pe_{n3}$  с ростом расстояния  $a^*$ . Важно также отметить, что при достижении некоторого значения  $a^*$  ( $a^* = a_{кр3}^*$ ) отрыв упрочненной зоны от режущей кромки сопровождается проплавлением обрабатываемой поверхнос-

ти. Согласно полученным данным величина  $a_{кр3}^*$  существенно зависит от угла заточки инструмента  $\varphi_1$  (см. рис. 5). Здесь картина аналогична описанной выше для параметра  $a_{кр2}^*$ . А именно, чем больше угол заточки  $\varphi_1$ , тем меньше, при прочих равных условиях, значение  $a_{кр3}^*$ .



**Рис. 5.** Зависимость третьего порогового числа  $Pe_{n3}$  от расстояния  $a^*$  между режущей кромкой и центром пятна нагрева при радиусе пятна нагрева  $r_0 = 1,0$  для различных углов заточки режущего инструмента  $\varphi_1$ : 1 –  $\varphi_1 = \pi/4$ ; 2 –  $\varphi_1 = \pi/3$ ; 3 –  $\varphi_1 = \pi/2$ . А – отрыв упрочненной зоны; В – отсутствие отрыва – упрочненной зоны

Обращает на себя внимание и тот факт, что числа Пекле  $Pe_{n3}$ , отвечающие значениям  $a_{кр3}^*$  для разных углов заточки инструмента, оказываются весьма близкими по величине (см. рис. 5).

В заключение необходимо отметить, что полученные данные о пороговых значениях технологических параметров могут служить основой для проектирования технологического процесса закалки режущего инструмента.

**Выводы.** С использованием методов полиаргументных систем получены решения задач теплопереноса в рассматриваемом режущем инструменте при его упрочнении лучом лазера и на этой основе определены пороговые значения технологических параметров, разграничивающие области их благоприятных и недопустимых режимов.

### Перелік використаних джерел

Colombini, E., Bocchini, G. F., Sola, R., Parigi, G., Poli, G., & Veronesi, P. (2015). Laser hardening of homogeneous and inhomogeneous p/m steels. *La Metallurgia Italiana*, 10(107), 15–24.

Idan Alaa Fadhil, I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., & Kostyk, K. (2016a). The Study of the Influence of Laser Hardening Conditions on the Change in Properties of Steels. *Eastern-Europe-*

*an Journal of Enterprise Technologies*, 2/5(80), 69–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>

Idan Alaa Fadhil, I., Akimov, O. V., Kostik, Ye. A., & Goncharuk, A. A. (2016b). Influence of preliminary heat treatment and laser hardening modes on steel structure-forming. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 18(1190), 66–73. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2016.18.10>

Klocke, F., Schulz, M., & Gräfe, S. (2017). Optimization of the Laser Hardening Process by Adapting the Intensity Distribution to Generate a Top-hat Temperature Distribution Using Freeform Optics. *Coatings*, 7(77), 16. <https://doi.org/10.3390/coatings7060077>

Lesyk, D. A., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Mordyuk, B. N., & Prokopenko, G. I. (2015). Surface Microrelief and Hardness of Laser Hardened and Ultrasonically Peened AISI D2 Tool Steel. *Surface and Coatings Technology*, 278, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.049>

Lesyk, D. A., Martinez, S., Mordyuk, B. N., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Prokopenko, G. I., Milman, Yu. V., & Grinkevych, K. E. (2017). Microstructure Related Enhancement in Wear Resistance of Tool Steel AISI, D2 by Applying Laser Heat Treatment Followed by Ultrasonic Impact Treatment. *Surface and Coatings Technology*, 328, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.045>

Lobankova, O. V., Zykov, I. Y., Melnikov, A. G., & Turanov, S. B. (2016). Influence of laser radiation on structure and properties of steel. *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea*, (pp. 75–78), May 29–31, 2016. London: CRC Press.

Martinez, S., Lamikiz, A., Ukar, E., Calleja, A., Arrizubieta, J. A., & Lopez de Lacalle, L. N. (2017). Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process. *Optics and Lasers in Engineering*, 90, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.005>

Martinez, S., Lamikiz, A., Ukar, E., Tabernero, I., & Arrizubieta, I. (2016b). Control Loop Tuning by Thermal Simulation Applied to the Laser Transformation Hardening with Scanning Optics Process. *Applied Thermal Engineering*, 98, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.037>

Martinez, S., Lesyk, D. A., Lamikiz, A., Ukar, E., & Dzhemelinskyi, V. V. (2016a). Hardness Simulation of Over-Tempered Area During Laser Hardening Treatment. *Physics Procedia*, 83, 1357–1366. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.143>

Monisha, K., Selvamuthumari, P., Narendran, D., Parray, R. A., & Senthilselvan, J. (2017). Laser Hardening and Pack Boriding of EN 8D Steel. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 2(9), 240–243. <https://doi.org/10.2412/mmse.13.65.82>

Prokopov, V. G., Bepalova, E. I., & Sherenkovskii, Iu. V. (1986). Primenenie metodov polnykh poliargumentnykh sistem dlia resheniia nelineinykh mnogomernykh zadach teploperenosa. *Izvestiia VUZov. Energetika*, 33, 84–89. [In Russian].

Prokopov, V. H. (2010). Pidvyschennia efektyvnosti modeliuвання bahatovymirnykh protsesiv teploperenosu na osnovi metodiv poliargumentnykh system i teorii lokalizatsii. *Abstract of Doctoral Dissertation for Technical Sciences*. Kyiv: NTUU "KPI", 44 p. [In Ukrainian].

Ruetering, M. A. (2016). Laser Hardening The known but unknown application. *Laser Technik Journal*, 3, 30–33. <https://doi.org/10.1002/latj.201600016>

Sancho, P., Montealegre, M. A., Dominguez, J., Alvarez, P., & Isaza, J. (2018). Dynamic control of laser beam shape for heat treatment. *Journal of Laser Applications*, 3(30), 032507. <https://doi.org/10.2351/1.5040647>

Sato, M., Adachi, Y., & Motoyama, H. (2016). Application of Laser Hardening Technology to Sintered Parts. *Sei Technical Review*, 82, 66–69.

Veronesi, P., Sola, R., Colombini, E., Giovanardi, R., & Parigi, G. (2017). Laser hardening of steel sintered parts. *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry*, September 11–13, 2017. Modena, Italy, IAN: 17244911. <https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065936>

## **DETERMINATION OF THRESHOLD VALUES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER HARDENING ON THE BASIS OF POLYARGUMENT SYSTEMS METHODS**

The article is devoted to the determination of the threshold values of technological parameters during laser hardening of the cutting tool. This determination was based on solving a volume quasi-stationary heat transfer problem for a wedge-shaped region in the presence of a normally-distributed laser heating source moving at a constant velocity. To solve this problem, the polyargument systems method was used, which is characterized by high adaptive properties with respect to the multidimensionality factor. The provisions that are the basis for constructing these methods are given. Using the method of polyargument systems, the threshold values of the technological parameters were obtained for the following three negative situations observed in the practice of hardening the cutting tool: 1) penetration of the cutting edge itself; 2) penetration of a zone adjacent to the surface to be treated and located at a distance from the cutting edge; 3) separation of the hardened zone from the cutting edge (i.e., in this case, the actual cutting edge is not strengthened). For the first of these situations, the extreme nature of the dependence of the dimensionless threshold velocity of the laser beam  $Pe_{n1}$  on the distance  $a^*$  between the cutting edge of the tool and the centre of the beam is established. The explanation of the obtained dependence is given on the basis of the analysis of the action of a number of competing factors. For the second and third of the considered negative situations, the dependences of dimensionless threshold velocities  $Pe_{n2}$  and  $Pe_{n3}$  on the value of  $a^*$  are monotonically decreasing. The fact of insignificant dependence of the magnitude  $Pe_{n2}$  on the quantity  $a^*$  is established for relatively large values of  $a^*$ , which is a consequence of the manifestation of the effect of localization of the influence of the unheated surface of the instrument on its thermal state. The regularities of the influence of the sharpening angle of the cutting tool on the threshold values of technological parameters are revealed. It is shown that the threshold values of the dimensionless velocity are the larger, the smaller, all other conditions being equal, the sharpening angle of the wedge. The obtained threshold values of the parameters should be used when selecting the technological modes of hardening the cutting tool with a laser beam.

**Keywords:** laser beam hardening; mathematical modeling; heat transfer processes; cutting tool.

*Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський, В. Л. Юрчук, Н. О. Меранова, Н. П. Полозенко*  
*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОГОВИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ПОЛІАРГУМЕНТНИХ СИСТЕМ**

Для умов загартування різального інструменту променем лазера досліджено закономірності зміни порогових значень технологічних параметрів, які розділяють їх сприятливі і неприпустимі величини. Наведено опис основних положень методів поліаргументних систем, що використовуються для визначення вказаних порогових значень, зокрема положення про необхідність виключення з шуканого рішення будь-яких апріорних елементів, положення про реалізацію повноти функціонального відображення шуканої інформації в редукованій задачі, а також положення про редукцію багатовимірної задачі до особливих одновимірних задач. Виявлено особливості поведінки порогових значень технологічних параметрів стосовно трьох негативних ситуацій, які спостерігаються у практиці загартування різального інструменту: 1) проплавлення власне різальної кромки; 2) проплавлення деякої зони, прилеглої до оброблюваної поверхні і розташованої на відстані від різальної кромки; 3) відрив зміцненої зони від різальної кромки (тобто в цьому випадку власне різальна кромка є незміцненою). Для цих ситуацій отримано залежності порогових значень швидкості руху лазерного променя від відстані між різальною кромкою і центром променя за різних величин кута заточування інструменту. Виконано інтерпретацію отриманих залежностей на основі аналізу дії різних, зокрема і конкуруючих, чинників. Зроблено висновок про те, що знайдені порогові значення повинні слугувати основою для проектування технологічного процесу загартування різального інструменту.

**Ключові слова:** загартування променем лазера; математичне моделювання; процеси теплопереносу; різальний інструмент.