

А. А. Александров¹, А. А. Серболлина¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИМИ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Термическая обработка является важной технологической операцией при изготовлении деталей и инструментов. Из всех видов термической обработки, закалка значительно повышает такие механические свойства, как прочность и твердость. В процессе закалики происходит быстрое неравномерное охлаждение заготовки, которое формирует уровень температурных напряжений, превышающий предел текучести материала, что в свою очередь приводит к возникновению неравномерных пластических деформаций заготовки. Для предотвращения коробления, возникающего при механической обработке закаленных заготовок, необходимо формировать низкий уровень остаточных напряжений, чтобы установить такой уровень остаточных напряжений необходимы эффективные средства охлаждения.

На сегодняшний момент мы имеем большое количество различных закалочных жидкостей – это вода, масла, водные растворы солей и щелочей, закалочные жидкости с добавлением полимеров, а также с добавлением наночастиц и других компонентов, с одновременным применением различных методов обработки, при помощи которых можем получить необходимый нам широкий диапазон значений коэффициента теплоотдачи до 50000 Вт/м² *К, что позволяет производить закалку в широком диапазоне скоростей охлаждения, формирующие необходимое распределение остаточных напряжений и остаточных деформаций в заготовках и деталях.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, термическая обработка, закалка, увеличение коэффициента теплоотдачи, закалочные среды, остаточные напряжения, остаточные деформации.

A. A. Aleksandrov¹, A. A. Serbolina¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF QUENCHING ENVIRONMENTS, NECESSARY TO CONTROL THERMAL RESIDUAL STRESSES AND DEFORMATIONS DURING THE HEAT TREATMENT OF WORKPIECES AND PARTS

Abstract. Heat treatment is an important technological operation in the manufacture of parts and tools. Of all types of heat treatment, hardening significantly improves mechanical properties such as strength and hardness. During the hardening process, rapid uneven cooling of the workpiece occurs, which forms a level of temperature stress that exceeds the yield strength of the material, which in turn leads to the occurrence of uneven plastic deformations of the workpiece. To prevent warping that occurs during machining of hardened workpieces, it is necessary to form a low level of residual stresses; to establish such a level of residual stresses, effective means of cooling are necessary.

Today we have a large number of different quenching liquids - these are water, oils, aqueous solutions of salts and alkalis, quenching liquids with the addition of polymers, as well as with the addition of nanoparticles and other components, with the simultaneous use of various processing methods, with the help of which we can obtain the required We provide a wide range of heat transfer coefficient values up to 50,000 W/m² *K, which allows hardening to be carried out in a wide range of cooling rates, forming the necessary distribution of residual stresses and residual deformations in workpieces and parts.

Key words: heat transfer coefficient, heat treatment, hardening, increase in heat transfer coefficient, quenching media, residual stresses, residual deformations.

Введение

Термическая обработка является важной технологической операцией при изготовлении деталей и инструментов. Она наделяет их нужными механическими свойствами и обеспечивает высокие эксплуатационные показатели. Определяющими факторами, которые влияют на результаты термической обработки, являются скорость и температура нагрева, равно как время выдержки в нагретом состоянии и скорость охлаждения. В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения различают несколько видов термической обработки, такие как закалка, отпуск, отжиг, старение, нормализация, криогенная обработка. Из всех перечисленных видов термической

обработки, закалка значительно повышает такие механические свойства, как прочность и твердость [9].

В процессе закалки происходит быстрое неравномерное охлаждение заготовки, которое часто формирует уровень температурных напряжений, превышающий предел текучести материала, что в свою очередь приводит к возникновению неравномерных пластических деформаций заготовки. При полном охлаждении заготовки до равномерной температуры по всему телу, неравномерные пластические деформации, возникшие при закалке, приводят к возникновению термических остаточных напряжений. Термические остаточные напряжения в свою очередь приводят к короблению обрабатываемой заготовки, трещинам на поверхности материала, быстрому износу и другим негативным явлениям. Вышеперечисленные факторы зачастую негативно сказываются на качестве изделий современного машиностроения, учитывая высокие требования к точности, надежности и долговечности.

По этой причине проблема влияния остаточных напряжений на вышеперечисленные параметры получает особое значение [2]. Для предотвращения коробления, возникающего при механической обработке закаленных заготовок, необходимо формировать низкий уровень остаточных напряжений, либо такое распределение остаточных напряжений, позволяющее при обработке резанием получить допустимые отклонения от формы и размеров. Требуемый уровень остаточных напряжений в термообработанных заготовках можно получить путём проведения асимметричного охлаждения при закалке. Асимметричное охлаждение заготовок, со скоростью выше критической и формирующее значительный температурный градиент по толщине охлаждаемого изделия, а также требуемый уровень остаточных напряжений, нуждается в эффективных средствах охлаждения, при помощи которых можно закалить в том числе изделие большей толщины.

Для качественного управления напряженно-деформированного состояния, остаточных напряжений и деформаций, необходимо сформировать понимание о закалочных средах, способных обеспечивать широкий диапазон коэффициента конвективной теплоотдачи, который позволяет получать необходимую скорость охлаждения и требуемое распределение остаточных напряжений и остаточных деформаций.

Характеристика закалочных сред.

Наиболее распространенные охлаждающие жидкости при закалке — это вода, масла, водные растворы солей и щелочей, а также закалочные жидкости с добавлением полимеров и других компонентов, с одновременным применением различных методов обработки.

При охлаждении в минеральном масле характерна относительно высокая температура, при которой имеет место максимум теплоотдачи. Для растительного масла характерны, во-первых, высокая температура максимума теплоотдачи, а во-вторых, очень малая интенсивность теплоотдачи при пониженной температуре. Эти особенности растительного масла обеспечивают для изделий малой массы быстрое охлаждение в перлитном интервале и медленное охлаждение в мартенситном интервале температур. Коэффициент теплоотдачи при охлаждении в масле достигает $15000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ [5].

Охлаждающая способность в воде зависит от условия движения жидкости относительно поверхности изделия. Исследования показали, что коэффициент теплоотдачи в спокойной воде достигает $21000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, а в циркулирующей воде со скоростью $0,25 \text{ м/с}$ — $25500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ [4]. Такие большие значения коэффициента теплоотдачи до $21000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ сохраняются не во всем диапазоне температур при закалке, а только на определенных этапах, которые соответствуют пузырьковому режиму кипения жидкости на поверхности закаливаемых заготовок.

Даже незначительное количество примесей солей и щелочей существенно изменяет охлаждающую способность воды. Установлено, что это связано с влиянием примесей на устойчивость паровой пленки на поверхности охлаждаемого изделия. При этом растворимые примеси уменьшают, а нерастворимые, наоборот, увеличивают стабильность паровой пленки. Это свойство водных растворов было использовано для разработки закалочных сред с высокой и пониженной охлаждающей способностью. Максимальный

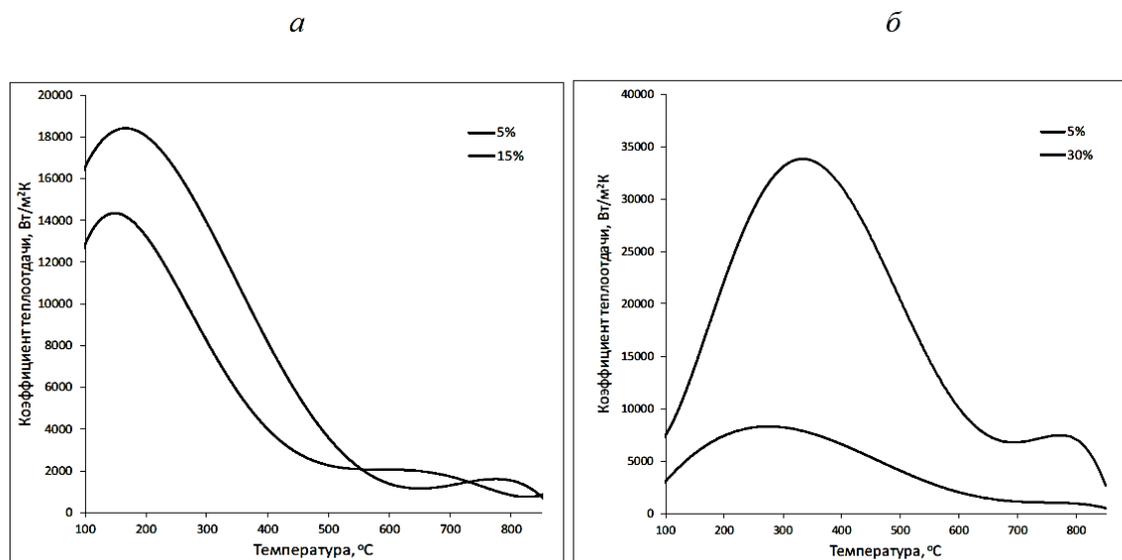
коэффициент теплоотдачи в водных растворах солей и щелочей, а также в водно- масляных эмульсиях достигает $23000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ [5].

Механизм процесса охлаждения в растворах полимеров основан на понижении или повышении растворимости полимера в процессе нагрева закалочной среды. По этому признаку различают две группы закалочных сред.

К первой группе относятся среды, в которых растворимость полимера уменьшается с повышением температуры и при соприкосновении с нагретым металлом полимер выпадает из раствора, образуя на поверхности металла осадочный слой. Этот слой, как правило, замедляет процесс теплообмена жидкости с металлом и снижает скорость охлаждения металла. Образовавшийся осадок растворяется в закалочной жидкости.

Ко второй подгруппе относятся пленкообразующие полимерные закалочные среды. Пленка, образующаяся на поверхности охлаждаемого металла, стабилизирует паровую рубашку и в конце охлаждения оседает на поверхность детали, тем самым замедляя скорость охлаждения в нижнем (мартенситном) интервале температур. Следовательно, с изменением концентрации компонентов закалочных сред на основе водорастворимых полимеров можно подобрать для деталей из различных марок сталей такие скорости охлаждения, которые обеспечивают необходимую прокаливаемость, твердость и другие механические свойства.

Установлено, что в случае применения водного раствора полимерной среды Thermisol (рис. 1, а) максимальная интенсивность теплоотдачи на поверхности изделия ($14000\text{--}18000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$) наблюдается при температуре ниже $300 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует интервалу мартенситного превращения в конструкционных сталях. При этом на стадии пленочного кипения ($800\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$) коэффициент теплоотдачи составляет всего $1000\text{--}2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Резкое увеличение интенсивности охлаждения в процессе мартенситного превращения может негативно сказаться на уровне напряжений в детали при закалке и привести к образованию закалочных трещин [8].



**Рис.1. Расчетные температурные зависимости коэффициента теплоотдачи водных растворов полимерных закалочных сред:
а – Thermisol; б – Aquatensid**

Водный раствор полимера Aquatensid (рис. 1, б) обеспечивает максимальную интенсивность охлаждения в температурном интервале $300\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом в зависимости от концентрации максимальное значение коэффициента теплоотдачи изменяется от $35000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (при концентрации раствора 5%) до $8000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (при концентрации раствора 30%). На стадии пленочного кипения коэффициент теплоотдачи также существенно зависит от концентрации раствора и изменяется от $7000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ до $1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ при увеличении концентрации раствора от 5 до 30% [8].

Одним из способов повышения охлаждающей способности закалочных сред является

использование так называемых наножидкостей. Наножидкость – это суспензия наноразмерных частиц (1–100 нм) металлов, оксидов металлов, углеродных нанотрубок, композитных частиц в базовой жидкости [7].

В ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи всегда возрастает при увеличении среднего размера наночастиц. Наножидкость со средним размером частиц ZrO_2 44 нм интенсифицирует теплообмен на 13 %, а для среднего размера частиц ZrO_2 105 нм интенсификация составляет 20 % относительно базовой жидкости [7].

В отличие от ламинарного режима течения, при турбулентном режиме зависимость среднего коэффициента теплоотдачи наножидкости от размера частиц имеет максимум. Для наножидкости с частицами SiO_2 максимум коэффициента теплоотдачи ($43000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) наблюдается при среднем размере частиц 25 нм.

Значение интенсификации теплообмена зависит от базовой жидкости, на основе которой приготовлена наножидкость. Приращение коэффициента теплоотдачи будет выше для жидкостей с меньшим коэффициентом теплопроводности. Например, при одинаковой объемной концентрации частиц (1 %) наноалмазов в дистиллированной воде повышение значения среднего коэффициента теплоотдачи составит на $4600 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, а в этиленгликоли коэффициент теплоотдачи возрастает на $7000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ [7].

Перспективным способом управления свойствами наножидкостей может являться приложение к ним электромагнитных полей. После того как стало понятно, что максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи за счет использования наножидкостей, как правило, не превышает нескольких десятков процентов, начались поиски способов дальнейшего повышения эффективности применения наножидкостей.

Крайне интересными и полезными могут быть наножидкости на основе ферромагнитных материалов (например, частицы железа и его оксиды Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , никеля и т. д.). Типичный пример изменения среднего значения коэффициента теплоотдачи при воздействии на поток наножидкости магнитного поля показан на рисунке 2. В интервале от 0 до 100 секунд измерения проводились без воздействия магнитного поля, затем вблизи стенки рабочего участка были установлены три постоянных магнита, при этом запись измеряемых параметров не прерывалась. Как видно из графика, коэффициент теплоотдачи после резкого провала повышается при воздействии магнитного поля. Повышение коэффициента теплоотдачи происходит постепенно, примерно в течение 100 секунд, что соответствует наблюдаемому ранее времени. Проведенные аналогичные измерения для воды или немагнитных наножидкостей не выявили влияния магнитного поля на коэффициент теплоотдачи, что говорит о том, что влияние магнитного поля на измерительные приборы было исключено [7]. Анализируя график, представленный на рисунке 2, можно сделать вывод, что увеличение средних значений коэффициента теплоотдачи, характеризующего теплообмен наножидкости с охлаждаемым телом, возрастает на 40%.

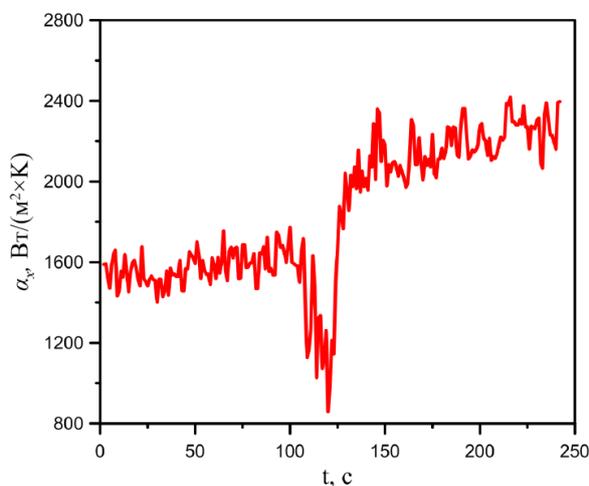


Рис. 2. Средний коэффициент теплоотдачи в зависимости от времени, $\varphi=0,25\%$. Действие магнитного поля началось в момент времени 100 с.

Заключение

На сегодняшний момент мы имеем большое количество различных закалочных жидкостей – это вода, масла, водные растворы солей и щелочей, закалочные жидкости с добавлением полимеров, а также с добавлением наночастиц и других компонентов, с одновременным применением различных методов обработки, при помощи которых можем получить необходимый нам широкий диапазон значений коэффициента теплоотдачи до $50000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, что позволяет производить закалку в широком диапазоне скоростей охлаждения, формирующие необходимое распределение остаточных напряжений и остаточных деформаций в заготовках и деталях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 146542 (СССР), МПК H05B3/00. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Е. Л. Суханов, Д. В. Будрин; заявл. 06.06.1961; 1962, Бюл. № 8.
2. Александров А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве мало жестких деталей: Дисс. канд. техн. наук / Александров А.А. – Иркутск: - 2015.
3. Патент 535491 (СССР), МПК G01N 25/00 Способ определения коэффициента конвективной теплоотдачи / Н.М. Цирельман; заявитель и патентообладатель Уфимский авиационный институт им. Орджоникидзе. - №535491; заявл. 21.06.1974; опубл. 15.11.1976.
4. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Краснолуцкий С.Л.– Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей.
5. Немчинский А.В. – Тепловые расчёты термической обработки./СудПромГИЗ – 1953.
6. Philip J., Shima P. D., Raj V. Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structure // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 91. P. 203108.
7. Гузей Д.В. Исследование вынужденной конвекции наножидкостей: Дисс. Канд. Физико-матем. наук/ Гузей Д.В. – Красноярск:-2021.
8. Майсурадзе М.В., Антаков Е.В., Назарова В.В., Юдин Ю.В. – Особенности закалочного охлаждения в полимерных средах.
9. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: Изд-во Металлургия, 1978. 5с.
10. Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Пряжников М. И., Шибелева А. А. Экспериментальное исследование транспорта магнитных наночастиц в круглом миниканале в постоянном магнитном поле // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 5. С. 2277–2285.
11. Гузей Д. В., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Исследование теплоотдачи наножидкостей в турбулентном режиме течения в цилиндрическом канале // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 2. С. 65–75.
12. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. 108 с.
13. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 840 с.
14. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 1. С. 148–160.
15. Гортышов Ю. Ф., Дресвянников Ф. Н., Идиатуллин Н. С. [и др.]. Теория и техника теплофизического эксперимента/2-е изд., перераб. и доп.-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 448 с.

REFERENCES

1. Patent 146542 (USSR), IPC H05B3/00. Device for determining the heat transfer coefficient / E. L. Sukhanov, D. V. Budrin; application 06/06/1961; 1962, Bull. No. 8.
2. Aleksandrov A.A. Modeling of thermal residual stresses in the production of low-rigid parts: Diss. Ph.D. tech. Sciences / Aleksandrov A.A. – Irkutsk: - 2015.
3. Patent 535491 (USSR), IPC G01N 25/00 Method for determining the convective heat transfer coefficient / N.M. Tsirelman; applicant and patent holder Ufa Aviation Institute named after. Ordzhonikidze. - No. 535491; application 06/21/1974; publ. 11/15/1976.
4. Rudyak V.Ya., Minakov A.V., Krasnolutsky S.L. – Physics and mechanics of heat transfer processes in nanofluid flows.
5. Nemchinsky A.V. – Thermal calculations of heat treatment./SudPromGIZ – 1953.
6. Philip J., Shima P. D., Raj V. Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structure // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 91. P. 203108.
7. Guzey D.V. Study of forced convection of nanofluids: Diss. Cand. Physics and mathematics. Sciences/ Guzey D.V. – Krasnoyarsk: -2021.
8. Maisuradze M.V., Antakov E.V., Nazarova V.V., Yudin Yu.V. – Features of quenching cooling in polymer media.

9. Novikov I.I. Theory of heat treatment of metals: Metallurgy Publishing House, 1978. 5 p.
10. Minakov A.V., Guzey D.V., Zhigarev V.A., Pryazhnikov M.I., Shebeleva A.A. Experimental study of the transport of magnetic nanoparticles in a round minichannel in a constant magnetic field // Engineering and Physical Journal. 2019. T. 92. No. 5. pp. 2277–2285.
11. Guzey D.V., Minakov A.V., Rudyak V.Ya. Study of heat transfer of nanofluids in a turbulent flow regime in a cylindrical channel. Izv. RAS. MZHG. 2016. No. 2. pp. 65–75.
12. Belov I. A., Isaev S. A. Modeling of turbulent flows: Textbook. St. Petersburg: Balt. state tech. Univ., 2001. 108 p.
13. Loytsyansky L. G. Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1970. 840 p.
14. Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Guzey D.V., Pryazhnikov M.I., Lobasov A.S. Measurement of the thermal conductivity coefficient of nanofluids by the heated filament method // Engineering and Physical Journal. 2015. T. 88. No. 1. P. 148–160.
15. Gortyshov Yu. F., Dresvyannikov F. N., Idiatullin N. S. [etc.]. Theory and technology of thermophysical experiment / 2nd ed., revised and additional ed. Moscow: Energoatomizdat, 1993. 448 p.

Информация об авторах

Александров Андрей Алексеевич - к. т. н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: alexandrov_aa@irgups.ru

Серболina Александра Алиевна - магистр., техник I категории кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: serbolina_aa@irgups.ru

Information about the authors

Aleksandrov Andrey Alekseevich Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the «Department of Automation of Production Processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: alexandrov_aa@irgups.ru

Serbolina Alexandra Alievna master's degree, technician I category of the department of "Electric rolling stock", Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: serbolina_aa@irgups.ru