

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН, С.А. ЛЕПЕШКИН

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия

МЕТОДИКА МНОГОФАКТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ И НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Разработана методика многофакторного моделирования режимов нагрева и охлаждения и нестационарного термонапряженного состояния деталей при высокоинтенсивной поверхностной индукционной закалке и модифицирован комплекс программ расчета. Проведены исследования режимов высокоинтенсивной закали деталей токами высокой частоты при удельных мощностях нагрева более 10 кВт/см^2 без принудительного охлаждения и с учетом фазовых превращений с использованием численного моделирования. Приведены результаты расчета нестационарного теплового состояния при скоростном высокоинтенсивном нагреве поверхностного слоя токами на частоте 440 кГц и интенсивном охлаждении его за счет теплопередачи теплопроводностью в холодные глубинные слои металла, термических и остаточных напряжений в детали при высокоинтенсивной закалке.

детали, многофакторное моделирование, высокоинтенсивная поверхностная закалка, термонапряжения, фазовые превращения, распределение температуры, остаточные напряжения, токи высокой частоты, удельные мощности нагрева, охлаждение

Формулирование проблемы

Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Индукционный нагрев используется в разных технологических процессах, в том числе, и в процессах поверхностной закали деталей.

При обычной закалке [1 – 5] деталей токами высокой частоты применяются удельные поверхностные мощности нагрева менее 5 кВт/см^2 с последующим принудительным охлаждением водой, маслом и другими специальными закаливающими средами.

При принудительном охлаждении возникают значительные растягивающие остаточные напряжения под закаленным слоем.

Высокоинтенсивная поверхностная закалка с высокими удельными мощностями нагрева позволяет получить мелкозернистую структуру металла и остаточные сжимающие напряжения на поверхности деталей, устранить максимумы остаточных растяги-

вающих напряжений после закали вблизи закаленного слоя, повысить износостойкость деталей в несколько раз. При этом отсутствует коробление и необходимость применения специальных закалочных сред и последующей механической обработки.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач. Существуют разные способы скоростного нагрева поверхностных слоев металлических изделий с использованием лазерного, электронно-лучевого и плазменного нагрева, а также индукционного с применением токов высокой частоты (ВЧ). При ВЧ-нагреве осуществляется ввод энергии в деталь на глубину, примерно соответствующую глубине проникновения электромагнитной волны, что снимает ограничения, существующие при поверхностном нагреве другими способами.

После лазерной закали на поверхности деталей с учетом порядного прохода лазерного луча возникают чередующиеся зоны с растягивающими и сжимающими остаточными напряжениями. Наличие зон

с повышенными растягивающими напряжениями может привести к появлению дефектов в деталях и к снижению их прочности и износостойкости. В отличие от лазерного нагрева на нагреваемой поверхности деталей после ВЧ закалки возникают сжимающие остаточные напряжения, что повышает прочностные характеристики деталей. Лазерный нагрев целесообразно использовать в труднодоступных местах деталей.

При обычной индукционной закалке деталей используются скорости нагрева менее 10^4 К/с.

В работе [5] при поверхностной индукционной закалке шестерен (зуб за зубом) на установке с частотой 0,066 МГц достигнуты скорости нагрева для зон вершины зубьев – 10^4 К/с, а во впадине – $5 \cdot 10^3$ К/с. Расчет индукционного нагрева стали под поверхностную закалку с удельными мощностями до 10 кВт/см² со скоростью нагрева до $2 \cdot 10^4$ К/с и временем нагрева до 0,04 с рассматривался в [6].

На установке ВЧГ4-25/0,44, оснащенной индуктором с ферромагнитным концентратором, при высококонцентрированном индукционном нагреве с закалкой в малых объемах деталей достигнуты удельные мощности нагрева $20 \div 50$ кВт/см² [7].

Для сравнения укажем, что при лазерной [7] и плазменной закалке деталей используются удельные мощности нагрева до 100 кВт/см². При индукционной закалке на частотах $0,44 \div 1,76$ МГц теоретически возможно достижение удельных мощностей нагрева до $200 \div 400$ кВт/см².

При скоростной ВЧ-закалке требуется, например, в первом случае получение тонких закаленных слоев от микрон до нескольких десятков микрон (штампы, высокоточные измерительные инструменты, швейные иглы, зубья пил и т.д.) и во втором случае закаленных поверхностных слоев до 1 мм и более (шестерни, рельсы, режущие инструменты, трубы и др.).

В первом случае необходимо применение ВЧ-генераторов с частотой более 5 МГц и мощностью в

несколько единиц или десятков кВт. Этому отвечает ряд промышленных стандартных ВЧ генераторов на частотах $5,28 \div 81,36$ МГц. Для скоростной поверхностной закалки мелких деталей использовались частоты $10 \div 30$ МГц [3, 8]. В [3] скоростные режимы нагрева применены при закалке швейных игл толщиной $0,65 \div 0,9$ мм, изготовленных из стали У9. Нагрев осуществлялся током частотой 12 МГц, охлаждение – маслом. Скоростной нагрев может быть использован и при непрерывно-последовательном методе поверхностной закалки. В [8] с помощью указанного метода была осуществлена скоростная закалка для зубьев ленточных пил при нагреве током частотой 27 МГц и удельной мощностью 10 кВт/см² с охлаждением без применения искусственной охлаждающей среды.

Во втором случае возможно применение ВЧ генераторов с мощностью от десятков до 200 кВт на частотах $0,066 \div 1,76$ МГц.

Термонапряженное состояние в поверхностных слоях деталей в процессе скоростного нагрева под закалку в [3 – 8] не определялось.

Процесс скоростной закалки стальных изделий с применением высокоинтенсивного индукционного ВЧ-нагрева состоит из скоростного нагрева тонкого поверхностного слоя и интенсивного охлаждения его за счет теплопередачи теплопроводностью в холодные глубинные слои металла без внешнего принудительного охлаждения. Указанный процесс нагрева и формирования структуры закаленных слоев сложен с учетом его нестационарности и многофакторности и еще мало изучен.

Большие перепады температуры в детали при скоростном ВЧ-нагреве могут привести к возникновению значительных термических напряжений в нагреваемом поверхностном слое детали, превышающих допустимые значения.

В математическом моделировании режимов закалки деталей токами высокой частоты требуется учитывать взаимосвязанные сложные физические

факторы: специфику индукционного нагрева, ферромагнитные свойства материала деталей и условия охлаждения, свойства материалов в зависимости от параметров электромагнитного поля (ЭМП), температуры, фазовых превращений и др.

В существующей литературе термические и остаточные напряжения не рассчитывались при высокоинтенсивной ВЧ закалке.

Цель исследований. Целью данных исследований являлась разработка методики многофакторного моделирования режимов нагрева и охлаждения и нестационарного термонапряженного состояния деталей с учетом остаточных напряжений при высокоинтенсивной поверхностной закалке токами высокой частоты нестационарного теплового и термонапряженного состояния деталей при закалке токами высокой частоты с учетом многих факторов при расчетах параметров электромагнитного поля, нестационарного теплового состояния при нагреве и охлаждении.

В данной методике моделирования высокоинтенсивной закали в впервые осуществляется комплексный расчет нестационарного электромагнитного и температурного полей, нестационарного термонапряженного состояния и остаточных напряжений с учетом фазовых превращений при высоких скоростях нагрева и охлаждения. Данная методика реализована в виде модифицированного комплекса программ расчета.

В частности, впервые проведены численные исследования режимов высокоинтенсивной поверхностной закали деталей токами высокой частоты с учетом термонапряжений при удельных мощностях скоростного нагрева более 10 кВт/см^2 на частоте 440 кГц и интенсивном охлаждении поверхностного слоя за счет теплопередачи теплопроводностью в холодные глубинные слои металла.

При этом получены кривые высоких удельных мощностей нагрева в зависимости от времени (скорости) нагрева.

Методика и результаты исследований

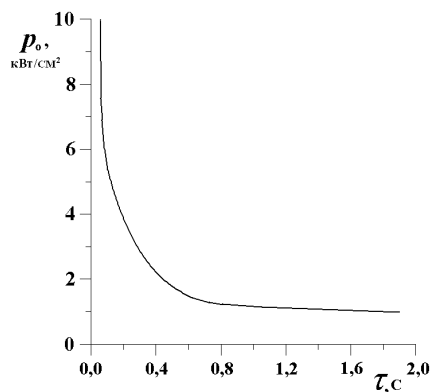
Исследования скоростного индукционного нагрева под поверхностную закалку проводились с разными удельными поверхностными мощностями с определением температур и термонапряжений в любой момент времени процессов нагрева и охлаждения и с учетом ограничений на термические и остаточные напряжения. При этом распределения остаточных напряжений определялись с учетом нестационарного теплового состояния, прочностных свойств детали при нагреве и охлаждении и фазовых превращений в материале детали.

С использованием разработанного программного пакета проведены расчетные исследования скоростного индукционного нагрева под поверхностную закалку цилиндрической детали из стали 45 диаметром 40 мм на частоте 440 кГц. По результатам расчета построены кривые удельных мощностей $1 \div 10 \text{ кВт/см}^2$ (рис. 1, а) и $10 \div 100 \text{ кВт/см}^2$ (рис. 1, б) в зависимости от времени нагрева, распределения температур (рис. 2, а) и осевых термонапряжений (рис. 2, б) в поверхностном слое детали при нагреве поверхности до температуры 1000°C со скоростями нагрева $2,5 \cdot 10^3 \div 3,5 \cdot 10^7 \text{ К/с}$ и расчетными удельными мощностями нагрева $2 \div 1000 \text{ кВт/см}^2$. Кривые на рис. 1, а и рис. 1, б позволяют выбрать время и скорость нагрева детали под поверхностную индукционную ВЧ закалку.

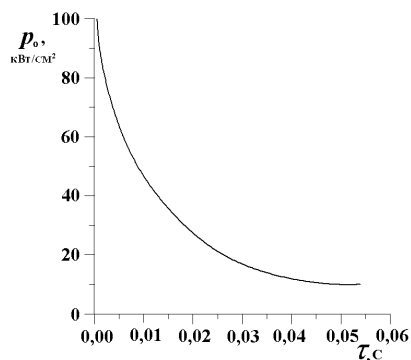
Анализ полученных распределений температур и осевых термонапряжений в упругопластической области показывает, что при повышении скорости нагрева под закалку градиенты температур и термонапряжения в поверхностном слое наиболее резко возрастают до значения удельной мощности 100 кВт/см^2 , а максимум сжимающих термонапряжений приближается к поверхности детали.

Максимумы осевых термонапряжений на кривых (рис. 2, б) образуются при переходе металла из упругого в упругопластическое состояние и являются опасными. Значения указанных максимумов за-

висят от распределения температуры в детали, т.е. от градиентов температуры. Максимум осевых термонапряжений при удельной мощности 100 кВт/см^2 достигает предела текучести ($\sigma_s = 270 \text{ МПа}$ при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) и остается примерно постоянным до 1000 кВт/см^2 , как видно из рис. 2, б.



а

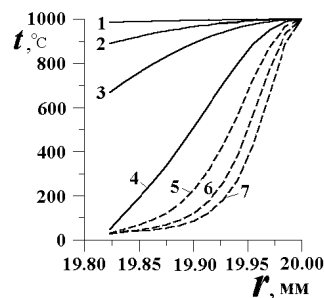


б

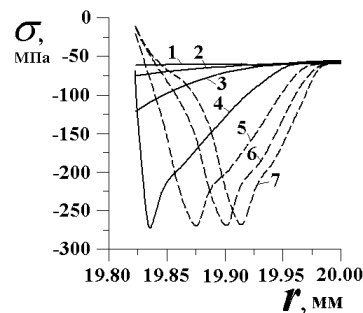
Рис. 1. Кривые удельных мощностей $1 \div 10 \text{ кВт/см}^2$ (а) и $10 \div 100 \text{ кВт/см}^2$ (б) в зависимости от времени нагрева

Известно, что прочностные характеристики материалов, в том числе, и предел текучести обладают рассеянием механических свойств. С учетом указанного обстоятельства скоростные режимы нагрева, при удельных мощностях более 100 кВт/см^2 , могут привести к возникновению опасных термонапряжений, т.е. появлению трещин и других дефектов.

Это касается особенно тех сталей, которые имеют пониженные значения пределов текучести и пластичности.



а



б

Рис. 2. Распределения температур (а) и осевых термонапряжений (б) в поверхностном слое детали ($r = 20 \text{ мм}$) при $t_{\text{зак}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$: кривым 1–7 соответствуют удельные мощности 2, 20, 50, 100, 200, 400 и 1000 кВт/см^2

Исследования остаточных напряжений в указанной выше детали после закалки на частоте тока 440 кГц проведены также с помощью разработанного пакета программ.

В данном процессе следует отметить прямое влияние параметров скоростного высокоинтенсивного нагрева (распределения температуры в детали) на режимы охлаждения и остаточные напряжения внутри технологического цикла скоростной индукционной закалки. С увеличением удельной мощности (скорости нагрева) деталь прогревается на меньшую глубину и, следовательно, она будет быстрее охлаждаться за счет передачи теплоты теплопроводностью в холодные слои металла. При удельной мощности нагрева 10 кВт/см^2 время охлаждения до температуры $140 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $2,5 \text{ с}$, а при 100 кВт/см^2 – $0,5 \text{ с}$. По результатам математического моделирования на рис. 3 представлены расчетные температурные кривые охлаждения детали после скоростного нагрева с разными удельными мощно-

стями нагрева: 1 – 10 кВт/см², 2 – 50 кВт/см², 3 – 100 кВт/см².

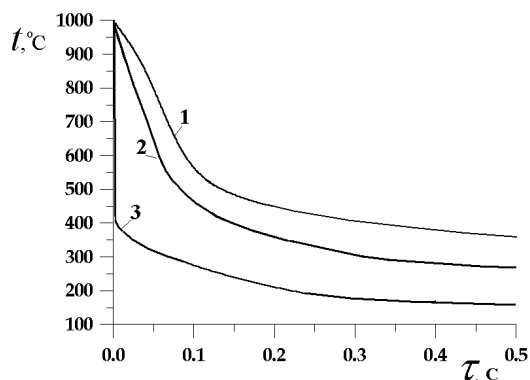


Рис. 3. Температурные кривые охлаждения детали после нагрева с разными удельными мощностями нагрева: 1 – 10 кВт/см², 2 – 50 кВт/см², 3 – 100 кВт/см²

По результатам расчета на рис. 4. построена кривая осевых остаточных напряжений (1) и глубины закаленного слоя (2) в зависимости от удельной мощности нагрева 10 ÷ 100 кВт/см². Распределения осевых остаточных напряжений по радиусу детали, соответствующие удельным мощностям нагрева 10 кВт/см² и 100 кВт/см², представлены на рис. 5, а и рис. 5, б соответственно.

Анализ результатов расчета показывает, что с повышением удельной мощности (скорости нагрева) с учетом указанного выше режима охлаждения остаточные сжимающие напряжения на поверхности детали увеличиваются, а остаточные растягивающие напряжения в средней части детали уменьшаются.

Кроме того, из анализа рис. 5, а и рис. 5, б следует, что максимумы остаточных растягивающих напряжений вблизи закаленного слоя детали отсутствуют, свойственные обычной закалке с принудительным охлаждением [1, 3, 4].

При достижении удельной мощности 100 кВт/см² осевые остаточные напряжения на поверхности возрастают до 820 ÷ 860 МПа достигают значений предела текучести закаленной детали 800 ÷ 850 МПа, что является опасным.

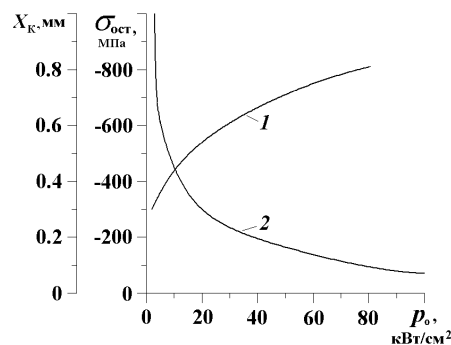


Рис. 4. Кривые осевых остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ (1) и глубины X_k (2) закаленного слоя в зависимости от удельной мощности скоростного нагрева 10 ÷ 100 кВт/см²

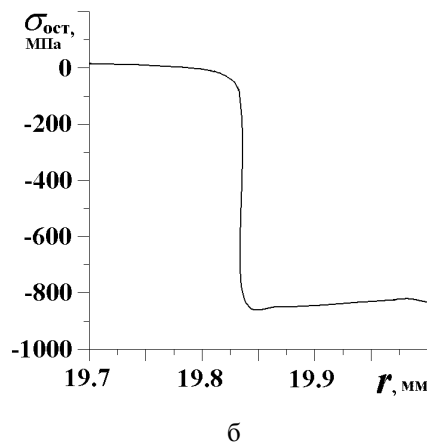
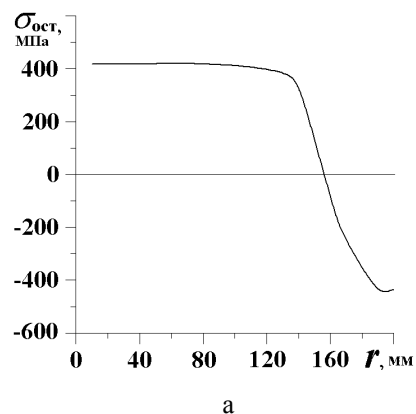


Рис. 5. Распределения осевых остаточных напряжений в детали при удельных мощностях скоростного нагрева 10 кВт/см² (а) и 100 кВт/см² (б)

Таким образом, при расчете режимов высокоинтенсивного индукционного нагрева и охлаждения стальных деталей под поверхностную закалку (скорости до 10⁶ К/с и время нагрева 10⁻² ÷ 10⁻⁴ с) необходимо учитывать ограничения на термические и

остаточные напряжения. Кроме того, приведены расчеты распределения твердости в поверхностных слоях детали с учетом фазовых превращений при высокоинтенсивной и обычной индукционной закалке.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Разработана методика многофакторного математического моделирования режимов нагрева и охлаждения и нестационарного термонапряженного состояния деталей с учетом остаточных напряжений при высокоинтенсивной поверхностной закалке токами высокой частоты. Модифицирован комплекс программ расчета.

Проведены исследования режимов высокоинтенсивной закалки деталей токами высокой частоты при удельных мощностях нагрева более 10 кВт/см^2 без принудительного охлаждения и с учетом фазовых превращений с использованием численного моделирования. Приведены результаты расчета нестационарного теплового состояния при скоростном нагреве поверхностного слоя токами на частоте 440 кГц и интенсивном охлаждении его за счет теплопередачи теплопроводностью в холодные глубинные слои металла, термических и остаточных напряжений в детали при высокоинтенсивной закалке.

Направлением дальнейших исследований является использование разработанной методики и комплекса программ для расчета режимов индукционной закалки локальных зон деталей и деталей сложной формы.

Полученные результаты и рекомендации и комплексная методика расчета могут быть использованы при разработке скоростных режимов нагрева с высокими удельными мощностями и охлаждения под поверхностную высокоинтенсивную закалку в различных отраслях машиностроения.

Литература

1. Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Методика моделирования нестационарного теплового и термонапряженного состояния деталей с учетом фазовых превращений при закалке токами высокой частоты // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 116 – 119.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
3. Серенсен С.В., Загриценко З.Т. Влияние поверхностной закалки с нагревом токами высокой частоты на сопротивление усталости валов из стали 40ХНМА. Выпуск № 235. – М.: Оборонгиз, 1953. – 23 с.
4. Головин Г.Ф., Замятин М.М. Высоочастотная термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
5. Гурченко П.С., Герман М.Л. Математическое моделирование температурного поля при закалке шестерен индукционным нагревом под слоем воды // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73, № 2. – С. 423 – 429.
6. Васильев А.С., Царевский В.В. Высокоинтенсивный индукционный нагрев // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 37 – 43.
7. Бровер Г.И., Варавка В.И., Русин А.П. Особенности строения и свойств инструментальных сталей после высококонцентрированного нагрева и отпуска // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – № 5. – С. 107 – 113.
8. Chandler H.E. Almost amorphous structure produced by pulse hardening // Metal Progress. – 1982. – V. 122, № 4. – P. 41 – 43.

Поступила в редакцию 30.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.А. Ножницкий, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва.