

УДК 519.868:621.791.92

М.Л. ВОЛОВОДУК, Л.П. КРАВЧЕНКО

Николаевский политехнический институт

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ НАПЛАВКОЙ ИЗ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ

Рассмотрена методика использования термокинетических диаграмм превращения аустенита сталей, полученных в условиях воздействия термомеханических циклов. Термокинетические диаграммы позволяют прогнозировать структурное состояние металла в зоне термического влияния при различных условиях наплавки и по структурному состоянию металла оценить свойства зоны термического влияния и склонность к образованию холодных трещин, что позволяет правильно выбрать режимы наплавки и термической обработки для обеспечения возможности многократного восстановления изношенных деталей до уровня вновь создаваемых.

Ключевые слова: *термомеханический цикл, термокинетическое превращение, наплавка, восстановление деталей, зона термического влияния, термокинетическая диаграмма, холодные трещины*

Введение

В настоящее время одним из основных вопросов ремонтного производства является восстановление изношенных деталей. Наряду с узкой номенклатурой основных и массовых деталей на поточных линиях особое место отводится широкой номенклатуре изделий, восстановление которых целесообразно на большинстве авиаремонтных предприятий. При этом важным условием является их восстановление до уровня новых при относительно невысокой стоимости.

Одним из наиболее экономичных, надежных и широко применяемых методов восстановления изношенных деталей является наплавка. Восстановление деталей летательных аппаратов наплавкой позволяет изменить свойства наплавленного металла.

Однако широкое применение этого метода тормозится тем, что большинство деталей летательных аппаратов изготавливаются из сталей, которые под влиянием наплавочного термомеханического цикла в зоне термического влияния (ЗТВ) закаляются на мартенсит, что приводит к образованию недопустимого дефекта – холодных трещин.

Цель статьи – прогнозирование структурного состояния металла зоны термического влияния при различных условиях наплавки при помощи термокинетических диаграмм превращения аустенита сталей, полученных в условиях воздействия термомеханических циклов.

1. Формулирование проблемы

Особонагруженными деталями летательных аппаратов являются шестерни редукторов.

Условия работы шестерен в редукторе зависят от многих факторов: скорости движения летательного аппарата, его нагрузки, смазки редуктора и т.д. В местах входа в зацепление зубья как бы бьют своими боковыми поверхностями друг по другу. Это и приводит к износу торцевых поверхностей зубьев шестерни за время ее эксплуатации.

Кроме того, шестерни испытывают статические нагрузки при работе, трение, действие крутящих моментов. Такие сложные условия работы шестерен приводят к небольшой длительности срока их службы.

Поэтому важной задачей является увеличение долговечности их работы, чего возможно достичь как повышением качества вновь изготавливаемой шестерни, так и ее ремонтом. В последнем случае изношенные объемы металла наносятся путем наплавки, а последующая механическая и термическая обработка позволяет получить изделие по качеству не уступающему вновь изготавливаемому.

Шестерни редукторов изготавливаются преимущественно из цементуемой стали 25ХГТ и нецементуемой 40Х. Для обеспечения их долговечности поверхность зуба должна иметь высокую твердость 50-60HRC, а глублежащий металл высокую прочность и вязкость. Поэтому для качественного восстановления изношенных зубьев наплавкой необходимо применение специальных наплавочных материалов, дающих химический состав металла наплавки, близкий к основному. Наиболее приемлемой для этих целей является наплавочная проволока Нп-30ХГСА. Кроме достаточного количества углерода и хрома она содержит около 1% Mn и 1% Si. Последние участвуют в раскислении металла напла-

вочной ванны, что обеспечивает высокое качество наплавленного металла. Наличие элементов раскислителей в проволоке Нп-30ХГСА позволяет применять ее как при наплавке под флюсом, так и при наплавке в защитных газах – CO_2 и аргоне.

С использованием этой проволоки была разработана технология восстановления наплавкой шестерен непостоянного зацепления. Технология предусматривает наплавку в среде CO_2 изношенных торцов зубьев на специальной установке. Для предупреждения образования холодных трещин в зоне термического влияния перед наплавкой производится предварительный подогрев шестерни в печи. Температура подогрева шестерни из стали 25ХГТ составляет $200 \dots 250^\circ\text{C}$, а для шестерни из стали 40Х – $350 \dots 400^\circ\text{C}$. Промышленное опробование этой технологии показало хорошее качество наплавленного металла, удовлетворительную его обрабатываемость. Применение последующей термической обработки позволяет получить восстановленные шестерни по свойствам близким к вновь изготовленным.

Однако, для широкого внедрения восстановления шестерен наплавкой необходимо располагать сведениями о структурных и фазовых превращениях в зоне термического влияния сталей 25ХГТ и 40Х, что позволит правильно выбрать режимы наплавки, термической обработки деталей и обеспечить высокую стойкость зоны термического влияния против образования холодных трещин.

2. Решение проблемы

Для получения таких данных удобно пользоваться термокинетическими диаграммами превращения аустенита сталей, полученными в условиях воздействия термомодеформационных циклов. Они позволяют прогнозировать структурное состояние металла зоны термического влияния при различных условиях наплавки и по структуре оценить свойства ЗТВ и склонность к образованию холодных трещин.

По методике [1,2,3] исследовалась кинетика превращения аустенита сталей при воздействии термомодеформационных циклов.

Жестко закрепленные образцы трубчатого сечения нагревались проходящим током до температуры 1250°C и затем охлаждались с различными скоростями. Нагрев осуществлялся со скоростью около $150^\circ\text{C}/\text{с}$, а регулирование охлаждения производилось продувкой через внутренне отверстие образцов аргона под различным давлением, охлаждением на воздухе, а также пропусканием на стадии охлаждения подогревающего тока.

В процессе нагрева и охлаждения с помощью осциллографа Н-700 регистрировалось изменение температуры образца, магнитной проницаемости

средней его части и усилий, возникающих в образцах за счет стесненности его перемещения при тепловом расширении или сокращении. Путем обработки осциллограмм построены диаграммы термокинетического превращения.

Исследование кинетики превращения аустенита применительно к высоко-температурным участкам ЗТВ для стали 25ХГТ изучали при скоростях охлаждения от $4,2^\circ\text{C}/\text{с}$ до $85^\circ\text{C}/\text{с}$. Подсчитывалась средняя скорость охлаждения в интервале $600 \dots 500^\circ\text{C}$. Диаграмма термокинетического превращения аустенита стали 25ХГТ приведена на рис. 1.

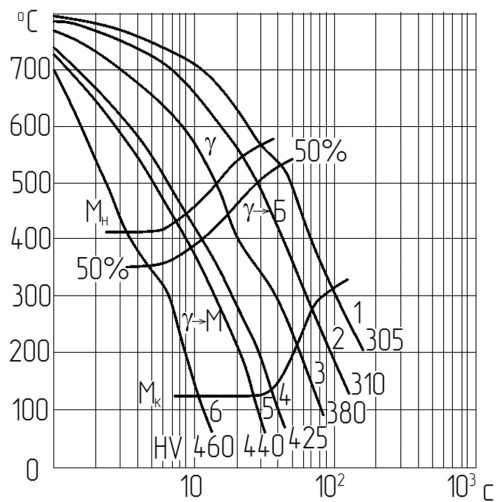


Рис. 1. Диаграмма термокинетического превращения аустенита стали 25ХГТ ($T_{\text{н}}=1250^\circ\text{C}$):

Средняя скорость охлаждения в интервале $600-500^\circ\text{C}$ по термоциклам:

1 – $4,2^\circ\text{C}/\text{с}$, 2 – $6,1^\circ\text{C}/\text{с}$, 3 – $32^\circ\text{C}/\text{с}$
4 – $38,5^\circ\text{C}/\text{с}$, 5 – $40^\circ\text{C}/\text{с}$, 6 – $85^\circ\text{C}/\text{с}$

Она характеризуется достаточной устойчивостью переохлажденного аустенита. При охлаждении в исследуемом диапазоне скоростей перлитное превращение отсутствует.

Охлаждение по термоциклам 1 и 2 (рис.1) со скоростями 4,2 и $6,1^\circ\text{C}/\text{с}$ приводит только к бейнитному превращению. При этом образуется смешанная структура верхнего и нижнего бейнита. Твердость образцов после такого охлаждения составляет $305 \dots 310\text{HV}$.

При охлаждении по термоциклу 3 со скоростью $32^\circ\text{C}/\text{с}$ аустенит претерпевает бейнитно-мартенситное превращение, а твердость образца повышается до 385HV .

При охлаждении по термоциклу 3 со скоростью $32^\circ\text{C}/\text{с}$ аустенит претерпевает бейнитно-мартенситное превращение, а твердость образца повышается до 385HV . Последующее увеличение скорости охлаждения до $40^\circ\text{C}/\text{с}$ и выше приводит к полному

превращению аустенита в мартенсит (термоциклы 5 и 6). Температура начала мартенситного превращения M_n равна 410°C , а заканчивается оно при $M_k=125^\circ\text{C}$. Твердость мартенсита составляет $440\dots460\text{HV}$.

Исследование кинетики превращения аустенита стали 40X после высокотемпературного нагрева изучалось при скоростях охлаждения от $1,2^\circ\text{C}/\text{с}$ до $300^\circ\text{C}/\text{с}$. Диаграмма термокинетического превращения приведена на рис. 2.

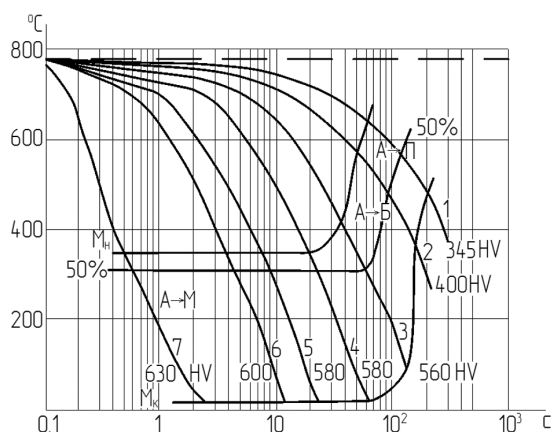


Рис. 2. Диаграмма термокинетического превращения аустенита стали 40X ($T_n=1250^\circ\text{C}$):

Средняя скорость охлаждения

в интервале $600\text{--}500^\circ\text{C}$ по термоциклам:

- | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – $1,1^\circ\text{C}/\text{с}$, | 2 – $2,3^\circ\text{C}/\text{с}$, | 3 – $10,5^\circ\text{C}/\text{с}$ |
| 4 – $22,2^\circ\text{C}/\text{с}$, | 5 – $60,2^\circ\text{C}/\text{с}$, | 6 – $130^\circ\text{C}/\text{с}$ |
| 7 – $1400^\circ\text{C}/\text{с}$ | | |

При медленном охлаждении со скоростью $1,2^\circ\text{C}/\text{с}$ (термоцикл 1) фазовое превращение аустенита происходит в температурном интервале $670\dots490^\circ\text{C}$.

В этом случае происходит диффузионный распад переохлажденного аустенита на ферритно-цементитную смесь преимущественно по перлитному механизму.

При охлаждении со скоростью $23^\circ\text{C}/\text{с}$ (термоцикл 2) происходит преимущественно бейнитное превращение аустенита в области температур $580\dots380^\circ\text{C}$. Увеличение скорости охлаждения приводит к превращению аустенита в мартенсит (термоциклы 3-7). После охлаждения в исследуемом интервале скоростей твердость стали 40X изменяется от 345HV до 630HV .

Диаграммы термокинетического превращения сталей 25ХГТ и 40Х, полученные в условиях имитации наплавки, позволяют определить оптимальные параметры наплавки, используя теорию распространения тепла [4,5].

Термический цикл можно подсчитать по формуле:

$$T = \frac{2Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{R^2}{4at}}; \quad (1)$$

где Q – количество вводимого тепла;

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, (x, y, z – координаты рассматриваемой точки в ЗТВ);

c, ρ, a – теплофизические константы.

Для сталей:

$$c \cdot \rho = 5 \text{ Дж}/\text{см}^3 \cdot \text{град}; \quad a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Путем наложения термического цикла на диаграмму термокинетического превращения стали 25ХГТ и 40Х можно определить какая структура и твердость образуется в ЗТВ при наплавке на сталь 25ХГТ и 40Х и возможность образования холодных трещин.

На основе теоретических расчетов термических циклов и экспериментальной проверки выбраны необходимые температуры предварительного подогрева, исключаяющие закалочные структуры в околошовной зоне (ОШЗ) при режимах наплавки, обеспечивающих хорошее формирование соединений. Для стали 25ХГТ оптимальная температура подогрева равна $200\dots250^\circ\text{C}$. Однако, с учетом структурных превращений в ОШЗ цементованного слоя ее нужно повысить до $250\dots300^\circ\text{C}$. Наплавленный металл в этом случае приобретает твердость $250\dots270\text{HV}$, а максимальная твердость ОШЗ не превышает $280\dots290\text{HV}$. При наплавке без предварительного подогрева твердость в ОШЗ достигает $520\dots550\text{HV}$, а наплавленного металла $380\dots410\text{HV}$.

Для шестерен из стали 40Х температура предварительного подогрева перед наплавкой должна быть $350\dots400^\circ\text{C}$. Наплавка без подогрева на сталь 40Х дает твердость наплавленного металла $380\dots430\text{HV}$, а ОШЗ – $500\dots550\text{HV}$. Предварительный подогрев до 300°C снижает твердость ОШЗ до $350\dots400\text{HV}$, а при подогреве до 400°C она снижается до 300HV . При этом твердость наплавленного металла не превышает $280\dots310\text{HV}$. Наплавка может производиться как стандартным полуавтоматом в среде CO_2 , так и на специальном наплавочном автомате.

Избыток наплавленного металла снимается механической обработкой на зубофрезерном и токарном станках.

Дальнейшая закалка механически обработанных шестерен с нагревом зубьев токами высокой частоты до 900°C и отпуск при 200°C с выдержкой 1ч приводят к получению твердости наплавленного металла зубьев $500\dots550\text{HV}$.

Использование кратковременного нагрева при закалке токами высокой частоты незначительно влияет на строение нитроцементованного слоя зубьев основного металла шестерни стали 25ХГТ и позволяет исключить применение дорогостоящей химико-термической обработки.

Для шестерен из стали 40Х из-за высокой температуры предварительного подогрева 350...400°С твердость металла на поверхности шлицевых отверстий может снижаться до 400HV. Ее можно повысить, применяя дополнительную закалку с нагревом токами высокой частоты до 900°С и последующим низким отпуском.

Заклучение

Разработанный технологический процесс позволяет производить многократное восстановление изношенных шестерен редукторов и является экономически целесообразным с точки зрения ресурсосберегающей технологии.

Литература

1. Лебедев Ю.М. Установка для исследования структурных превращений в условиях жестко закрепленного образца / Ю.М. Лебедев, Л.П. Кравченко // Труды НКИ. – Николаев: НКИ, 1973. – Вып. 66. – С. 12-16.

2. Кравченко Л.П. Исследование структурных превращений в условиях сварки титанового сплава ВТЗ-1 / Л.П. Кравченко, Ю.М. Лебедев // Тез.док. II Всесоюз. конф. по сварке цветных металлов. – Ташкент: Госиздат, 1982. – С. 28-32.

3. Воловодюк М.Л. Побудова аналітичної моделі термоциклування з фазовими перетвореннями в вуглецевих сталях / М.Л. Воловодюк // Техногенна безпека: Наукові праці. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили. – 2010. – Т. 137, вип. 124. – С. 16-22.

4. Шершоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шершоров, В.В. Белов. – М.: Наука, 1972. – 219 с.

5. Грабин В.Ф. Металловедение сварки наплавлением / В.Ф. Грабин. – К.: Наук. думка, 1982. – 416 с.

Поступила в редакцию 11.02.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., ректор Л.П. Клименко, Черноморский гуманитарный университет им.Петра Могили, Николаев.

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ НАПЛАВЛЕННЯМ ЗІ СТАЛЕЙ, ЩО ГАРТУЮТЬСЯ

М.Л. Воловодюк, Л.П. Кравченко

Розглянуто методику використання термокінетичних діаграм перетворення аустеніту сталей, отриманих в умовах впливу термодформаційних циклів. Термокінетичні діаграми дозволяють прогнозувати структурний стан металу в зоні термічного впливу при різних умовах наплавлення й за структурним станом металу оцінити властивості зони термічного впливу й схильність до утворення холодних тріщин, що дозволяє правильно вибрати режими наплавлення й термічної обробки для забезпечення можливості багаторазового відновлення зношених деталей до рівня знову створюваних.

Ключові слова: термодформаційний цикл, термокінетичне перетворення, наплавлення, відновлення деталей, зона термічного впливу, термокінетична діаграма, холодні тріщини.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS INTO THE ZONE OF THERMAL INFLUENCE AT RESTORATION OF DETAILS BY STEEL FACING FROM TEMPERED STEELS

M.L. Volovodyuk, L.P. Kravchenko

The technique of use of thermo kinetic diagrams of transformation of an austenite of the steels received in the conditions of influence of thermo deformation cycles is considered. Thermo kinetic diagrams allow to predict a structural condition of metal in a zone of thermal influence under various conditions of steel facing and on the structural condition of metal to estimate properties of the zone of thermal influence and propensity to formation of cold cracks that allows to choose correctly steel facing conditions and thermal processing to provide the ability of repeated restoration of the worn out details up to the initial condition.

Key words: a thermo deformation cycle, thermo kinetic transformation, steel facing, restoration of details, a zone of thermal influence, a thermo kinetic diagram, cold cracks.

Воловодюк Марина Леонидовна – соискатель, преподаватель кафедры математических и естественных дисциплин Николаевского политехнического института, Николаев, Украина, e-mail: vadim.volovodyuk@gmail.com.

Кравченко Леонид Прокофьевич – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» Николаевского политехнического института, Николаев, Украина.