

УДК 621.7

## **ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

© 2011 В. И. Трегуб, А. М. Никифоров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Свойства используемых конструкционных материалов во многом определяют повышение эксплуатационных показателей изделий авиационной техники. Сопротивление металлических материалов усталостному разрушению, как и другие физико-механические свойства, в значительной степени зависят от структуры. Лазерная термообработка деталей из стали 40ХН позволяет повысить сопротивление усталостному разрушению при увеличении микротвёрдости поверхностного слоя в зоне термического влияния в 2...2,5 раза. Возможно значительно снизить вероятность зарождения усталостных трещин в процессе эксплуатации.

*Усталостное разрушение, материал конструкционный, сталь, воздействие лазерное, термообработка, свойства физико-механические, структура, микротвёрдость, вероятность.*

### **Введение**

Свойства используемых конструкционных материалов во многом определяют эксплуатационные показатели изделий авиационной техники. Физико-механические свойства металлов и сплавов являются структурно-чувствительными, т.е. могут управляться посредством модификации структуры, в частности изменения формы и размера зёрен, вида и концентрации дефектов кристаллической решётки и других субструктурных единиц. Сопротивление металлических материалов усталостному разрушению, как и другие физико-механические свойства, в значительной степени зависят от структуры [1, 2 и др.]. С целью изменения структур материалов при производстве авиационной техники находят широкое применение термическая (тепловая) обработка, методы и средства осуществления которой непрерывно совершенствуются. Особую актуальность приобретает применение прогрессивных методов формирования структур конструкционных материалов при достаточно сложной конфигурации обрабатываемых поверхностей, корабление которых должно быть сведено к минимуму; при необходимости получения строго заданного профиля закалённого слоя; при ограничении подвода тепла к зоне обработки.

Хромоникелевая сталь 40ХН высокой прочности, повышенной вязкости и глубокой прокаливаемости применяется после норма-

лизации, улучшения, закалки и низкого отпуска, а также поверхностного упрочнения ТВЧ для изготовления ответственных деталей, работающих при наличии ударных и вибрационных нагрузок [3 и др.].

Однако имеют место единичные случаи разрушения деталей, выполненных из данного материала с поверхностно-закалённым слоем. Причиной разрушения деталей являлось зарождение трещины на термически упрочнённой поверхности и её развитие при нагрузках, не превышающих допустимые.

Целесообразно выявить особенности формирования структуры материала и разработать рекомендации к совершенствованию технологии термообработки, предоставляющей возможность снизить вероятность зарождения усталостных трещин в деталях типа полуось коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в процессе эксплуатации.

### **Выявление особенностей формирования структуры материала после проведения поверхностного упрочнения.**

Проведены металлографические исследования области излома стали 40ХН после поверхностного упрочнения ТВЧ. Область излома стали 40ХН, выполненного под углом 15° к обработанной поверхности, представлена на рис. 1, на котором отчётливо различимы две зоны, рельеф которых различен.



Рис. 1. Область излома стали 40XH, выполненного под углом  $15^\circ$  к обработанной поверхности; увелич.  $\times 15$

Приповерхностный слой после обработки лазерным воздействием имеет менее грубый рельеф. Структура представляет собой мартенсит, что характерно для закаленной структуры. Сердцевина характеризуется структурой с грубым рельефом. При проведении исследований микроструктуры излома с использованием растрового электронного микроскопа VEGA\ SB, Tescan выявлены формирующиеся в радиальном направлении трещины (рис. 2.). Структура материала сердцевины образца состоит преимущественно из сорбита и троостита и содержит неоднородности и выделения примесных фаз. Выделение фаз с более высокой температурой плавления, чем основной материал, обычно происходит по границам зёрен. Приложение периодических нагрузок приводит к формированию трещин на границах зерна, в дальнейшем распространение трещин происходит как по границам, так и через тело зерна.

Установлено, что наличие в доэвтектоидной стали 40XH ликваций серы и её соединений приводит к ускоренному развитию усталостного разрушения. Степень влияния неметаллических включений зависит от их формы, количества и характера распределения в объёме металлического материала, а также от химического состава и свойств. В результате металлографических и фактографических исследований определено, что неметаллические включения с содержанием серы до 20...25 % имеют цилиндрическую

форму и ориентированы вдоль оси детали, длина отдельных включений – более 100 мкм, а диаметр – около 2 мкм. Усталостные свойства при наличии включений имеют резко выраженную ориентацию.

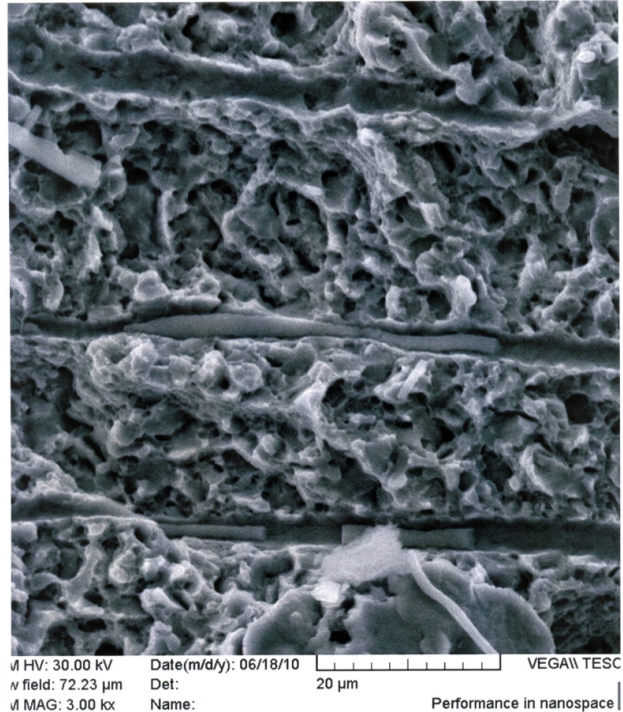


Рис. 2. Изображение сердцевины детали из стали 40XH; увелич.  $\times 3000$

### Разработка рекомендаций к совершенствованию технологии термообработки

Прогрессивным способом улучшения физико-механических свойств материалов является применение лазерного воздействия, важной особенностью которого является то, что плотность мощности сфокусированного излучения может превосходить практически все существующие источники нагрева. При сверхбыстром нагреве и охлаждении в металлических материалах происходит образование неравновесных структур. Целесообразность применения методов лазерного воздействия определяется возможностью бесконтактного, строго дозированного интенсивного подвода энергии на поверхность изделия. Обеспечивается локальность по глубине и площади физических процессов, протекающих в зоне термического влияния, при сохранении исходных свойств материала в остальном объёме и отсутствии значитель-

ных деформаций. Применение лазерного поверхностного упрочнения в ряде случаев позволяет повысить надежность изделий, снизить вероятность их разрушения за счет увеличения предела усталостной выносливости [4-9].

Определены температурно-скоростные режимы лазерной термообработки деталей из стали 40ХН. Для проведения исследований использовался технологический CO<sub>2</sub> слэб-лазер ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой. Осуществлялось воздействие квазинепрерывным лазерным излучением. Температурно-скоростные режимы обработки при воздействии квазинепрерывного излучения определяются величиной и распределением плотности мощности в пятне нагрева, а также длительностью воздействия и частотой следования импульсов. Применялось устройство формирования лазерного излучения на основе фокусатора излучения в отрезок равномерной интенсивности. Измерение распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости фокусатора проводилось измерителем мощности ИМО-2Н, перемещающимся в системе координат, перпендикулярной оси луча, и снабжённым квадратной диафрагмой площадью 10<sup>-8</sup> м<sup>2</sup>. Снижение мощности лазерного излучения достигалось при увеличении скважности импульсов. Контроль температурного поля в центре энергетического источника на поверхности образца осуществлялся с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра «Кельвин-1300 ЛЦМ» с диапазоном измерения температур 300...1300 °С [10, 11].

Установлено, что лазерная обработка приводит к существенным изменениям в структуре обрабатываемого материала. Металлографические исследования образцов из стали 40ХН показали, что при обработке без оплавления поверхности область термического влияния состоит из нескольких слоев, микротвердость каждого из которых в различной степени отличается от исходной. Верхний, наиболее твёрдый слой представляет собой мартенсит с микротвердостью  $H_{\mu} = (7500...8000) \cdot 10^6$  Па. Под ним

расположена область неполной закалки, имеющая структуру из мартенсита и феррита. Третий слой – переходная зона. При лазерном воздействии на предварительно термообработанную сталь в этом слое имеет место понижение микротвердости, связанное с образованием структур отпуска – троостоферрита, троостита или сорбита. Исходная структура материала – сорбит с твёрдостью  $H_{\mu} = (2850...3410) \cdot 10^6$  Па. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по глубине зоны термического влияния. При лазерном воздействии с требуемым распределением плотности мощности высокие скорости охлаждения при лазерном термоупрочнении обуславливают большую неоднородность и повышенную дисперсность структуры, увеличение плотности дислокаций и других дефектов кристаллической решётки, что является основными причинами увеличения твёрдости обрабатываемых материалов.

В результате проведенных исследований установлено, что применение лазерной термообработки деталей из стали 40ХН по схеме нагрева по спирали приводит к измельчению размера зерна, дроблению и более равномерному распределению соединений серы. В результате возрастает сопротивление усталостному разрушению при росте микротвердости поверхностного слоя в зоне термического влияния в 2...2,5 раза. Таким образом, лазерная термообработка с применением схемы нагрева по спирали позволяет значительно снизить вероятность зарождения усталостных трещин в деталях типа полуось коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в процессе эксплуатации.

#### **Заключение**

Проведены металлографические исследования области излома стали 40ХН после поверхностного упрочнения ТВЧ. Установлено, что наличие в доэвтектоидной стали 40ХН ликваций серы и её соединений приводит к ускоренному развитию усталостного разрушения. Степень влияния неметаллических включений зависит от их формы, количества и характера распределения в объёме

металлического материала, а также от химического состава и свойств. В результате металлографических и фактографических исследований определено, что неметаллические включения с содержанием серы до 20...25 % имеют цилиндрическую форму и ориентированы вдоль оси детали, длина отдельных включений – более 100 мкм, а диаметр – около 2 мкм. Усталостные свойства при наличии включений имеют резко выраженную ориентацию.

Определены температурно-скоростные режимы лазерной термообработки деталей из стали 40ХН. Для проведения исследований использовался технологический СО<sub>2</sub> слэб-лазер ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой. Лазерная термообработка деталей из стали 40ХН с применением схемы нагрева по спирали позволяет повысить сопротивление усталостному разрушению при увеличении микротвердости поверхностного слоя в зоне термического влияния в 2...2,5 раза. Возможно значительно снизить вероятность зарождения усталостных трещин в деталях типа полуось коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в процессе эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### Библиографический список

1. Горицкий, В.М. Структура и усталостное разрушение металлов [Текст] / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев. - М.: Металлургия, 1980. - 208с.
2. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов [Текст]: справочник, Ч.1,2. / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский - Киев: Наукова думка, 1987. - 1324 с.
3. Приданцев, М.В. Конструкционные стали [Текст]: справочник / М.В. Приданцев,

Л.Н. Давыдова, И.А. Тамарина - М.: Металлургия, 1980. - 288с.

4. Влияние лазерной обработки на сопротивление усталости и износостойкость сталей [Текст] / М.Я. Гальперин, И.М. Петрова, Л.И. Куксенова [и др.] // Вестн. машиностроения, 1985. - № 11 - С. 12-14.

5. Повышение усталостной прочности конструкций с помощью локального лазерного нагрева [Текст] / Н.И. Ободан, А.Г. Пацюк, А.П. Лопатенко [и др.] // Проблемы прочности, 1995. - № 4 - С.10-17.

6. Hackel, L.A. Shaping the future - laser peening technology has come of age // TSP. 2005. Vol 19, - № 3 - P. 8-12.

7. Мурзин, С.П. Проектирование прогрессивных технологических процессов лазерной обработки деталей при производстве двигателей и энергетических установок [Текст] / С.П. Мурзин // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - Вып. 2 (10) - Ч. 2. - С. 245-249.

8. Мурзин, С.П. Технологический метод повышения эксплуатационных характеристик деталей двигателей летательных аппаратов и энергоустановок лазерной обработкой [Текст] / С.П. Мурзин, В.И. Артюшина // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. Вып. 2 (10). - Ч. 2. - С. 250-254.

9. Мурзин, С.П. Разработка технологического метода повышения эксплуатационных характеристик деталей лазерной обработкой и определение требований к применению фокусаторов излучения [Текст] / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. 2006. - Вып. 30. - С. 44-48.

10. Мурзин, С.П. Исследования температурных полей в конструкционной стали при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения [Текст] / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. 2007. - Т. 31, - № 3. - С. 59-61.

11. Мурзин, С.П. Моделирование тепловых процессов при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения [Текст] / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, С.А. Сорокина // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2007. - Т. 9, - № 3 - С. 626-629.

## **INCREASE OF CHROME-NICKEL STEEL 40XH FATIGUE FAILURE RESISTANCE BY LASER INFLUENCE**

© 2011 V. I. Tregub, A. M. Nikiforov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Properties of used constructional materials mainly define increasing of aviation product's operational indicators. Fatigue failure resistance of metal materials, as well as other physicomechanical properties, substantially depends on structure. Laser heat treatment of details from steel 40XH allows raise fatigue failure resistance at microhardness increasing of a blanket in thermal influence zone in 2...2,5 times. It's possible to get lower probability of fatigue cracks origin while in service.

*Fatigue failure, constructional material, steel, laser influence, heat treatment, physicomechanical properties, structure, microhardness, probability.*

### **Информация об авторах**

**Трегуб Валерий Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиаматериаловедения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-61. E-mail: [tvj\\_v@rambler.ru](mailto:tvj_v@rambler.ru). Область научных интересов: лазерные технологии, материаловедение.

**Никифоров Аркадий Михайлович**, учебный мастер кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-61. E-mail: [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru). Область научных интересов: внедрение лазерных технологий в учебный процесс.

**Tregub Valery Ivanovich**, Candidate of Engineering science, the associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [tvj\\_v@rambler.ru](mailto:tvj_v@rambler.ru). Phone: (846) 267-46-61. Area of research: laser technology, science of materials.

**Nikiforov Arkady Mikhailovich**, the educational master, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-61. E-mail: [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru). Area of research: introduction of laser technologies in educational process.