

УДК 535(075)

РАЗУПРОЧНЕНИЕ ЗАГОТОВОК ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЛАЗЕРНЫМ ОТЖИГОМ

© 2008 С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведены экспериментальные исследования условий снятия наклепа и образования рекристаллизованной структуры с помощью лазерного нагрева, которые показали возможность протекания этих процессов в диапазоне температур рекристаллизации низколегированных титановых сплавов. Исследования свойств обработанных материалов показали, что применение лазерного отжига для местного разупрочнения перед формообразованием заготовок из металлических сплавов позволяет повысить точность изготовления деталей, уменьшить пружинение и радиусыгиба.

Разупрочнение, низколегированный сплав, лазерный отжиг, формообразование, пружинение, радиусгиба, наклеп, рекристаллизационная структура

С целью увеличения удельной прочности и жесткости изделий в штамповочном производстве деталей летательных аппаратов и их двигателей используют титановые сплавы. Средне- и высоколегированные титановые сплавы практически не поддаются холодному формообразованию из-за высокого сопротивления металла деформации, интенсивного упрочнения, склонности к растрескиванию и разрывам. Изготовление деталей проводят с нагревом заготовки на существующем в заготовительно-штамповочном производстве оборудовании традиционными и специальными приемами работы на специальной оснастке [1-3]. Нагрев заготовок проводится в электрических печах сопротивления, на установках радиационного и электроконтактного нагрева, а также кондукционным способом горячей оснастки. Низколегированные сплавы также имеют пониженные характеристики пластичности, что вызывает необходимость нагрева деформируемого металла. Наиболее важными специфическими особенностями, определяющими комплекс технологических свойств таких конструкционных материалов, наряду с ограниченными возможностями холодного деформирования являются их низкая теплопроводность и высокая активность взаимодействия с окружающей средой. Лазерный нагрев является более предпочтительным, так как он обеспечивает возможность значительного сокращения времени пребывания металла при температурах интенсивного окисления и газонасыщения поверхностных слоев.

Целью данной статьи является определение возможности применения лазерного отжига для местного разупрочнения листовых заготовок из низколегированных титановых сплавов ОТ4 и ОТ4-1.

Определение возможности применения лазерного отжига для разупрочнения низколегированных титановых сплавов

Титановые сплавы ОТ4-1 и ОТ4 относятся к группе сплавов с преобладанием α -твердого раствора и небольшим количеством β -фазы (псевдо α -сплавы) и имеют температуру полиморфного превращения соответственно $T_{\alpha+\beta\leftrightarrow\beta} = 1180 \div 1220$ К и $T_{\alpha+\beta\leftrightarrow\beta} = 1190 \div 1230$ К. Применяются для сварных узлов, деталей (в том числе, тонкостенных) и изделий, длительно работающих при температурах до 570 К и при 620 К (до 2000 час). Для низколегированных титановых сплавов формообразование с нагревом является основным способом формоизменения [3]. Эти сплавы имеют удовлетворительную технологическую пластичность в интервале температур 760...870 К для ОТ4-1 и 820...970 К – для ОТ4. Однако при технологических нагревах в воздушной среде до температур выше 770 К на поверхностях заготовок образуются оксидные и газонасыщенные слои, снижающие эксплуатационную прочность деталей и ухудшающие штампуемость материала [1-2].

Проведены экспериментальные исследования условий снятия наклепа и образования рекристаллизованной структуры с помощью лазерного нагрева, которые показали возможность протекания этих процессов в диапазоне температур рекристаллизации (для сплава ОТ4-1: $T_{\delta} = 990...1110$ К, а для сплава ОТ4: $T_{\delta} = 1030...1130$ К). Лазерная обработка деталей выполнена на CO₂-лазерном технологическом оборудовании ЛК-1300 “Хебр-1А”, “BYSTAR 2512” с излучателем BTL 1800. Определены параметры режима обработки: мощность лазерного излучения $Q = 450 \pm 5$ Вт; скорость обработки $v = 0,6 \pm 0,01$ м/с. Для целенаправленного изменения пространственного распределения мощности воздействующего высокоинтен-

сивного лазерного излучения применялись системы транспортировки и формирования пучков излучения, включающие в свой состав модули дифракционной оптики (фокусаторы излучения) [4-5]. На рис. 1 представлена структура листового низколегированного титанового сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м после проведения лазерного отжига. Исходный материал имеет волокнистую структуру. Зона отжига имеет зернистую структуру, представленную α -фазой и небольшим количеством β -фазы. При лазерном отжиге происходит рекристаллизация деформированной структуры, а также распад метастабильных фаз с образованием стабильной рекристаллизованной структуры.

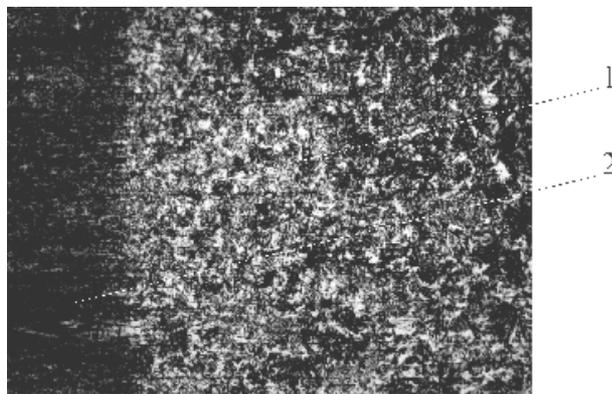


Рис. 1. Структура листового титанового сплава ОТ4-1 после лазерного отжига:
1 – зона отжига; 2 – исходная структура, увеличение $\times 300$

Исследование свойств обработанных материалов

Для определения предельного относительного удлинения, характеризующего пластичность сплавов, проведены испытания на растяжение образцов из листового материала ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Получены следующие результаты: относительное удлинение после разрыва до лазерного отжига имело значение 8,2 % (7,4...8,9 %), а после лазерного отжига – 21,5 % (18,5...23,5 %), т.е. повышение предельного относительного удлинения после лазерного отжига составляет 10...15 %.

Проведены испытания на изгиб образцов из листовых титановых сплавов. Оценка предельного угла изгиба осуществлялась на испытательной машине усилием 20 тс при

плавном увеличении нагрузки на образец до появления на нем первой трещины. Радиус закругления опор $r_{3,0}$ и диаметр закругления оправки $d_{3,0}$ устанавливались в соответствии с требованиями ГОСТ [6-7], и для листов из ОТ4-1 и ОТ4 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м их значения составляли: $r_{3,0} = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{3,0} = 6 \cdot 10^{-3}$ м. В результате проведенных испытаний были получены следующие результаты: предельный угол изгиба до лазерного отжига не превышал 1,13...1,29 рад для ОТ4-1 и 0,95...1,06 рад для ОТ4, после лазерного отжига составил 1,8...1,94 рад для ОТ4-1 и 1,47...1,62 рад для ОТ4. Таким образом, повышение предельного угла изгиба после лазерного отжига составляет 50...60 % для ОТ4-1 и ОТ4.

Применение лазерного отжига обеспечивает повышение предельного относительного удлинения на 10...15 %, увеличение предельного угла изгиба при холодном деформировании листовых деталей из низколегированных титановых сплавов ОТ4 и ОТ4-1 на 50...60 %, что предоставляет возможность проводить их формообразование без дополнительного подогрева.

Точность штампованных деталей зависит от большого числа факторов, являющихся причиной образования погрешностей. Такими факторами являются: тип штампа и способ фиксации заготовки, точность изготовления штампа и его износ, структура технологического процесса, т.е. количество и последовательность операций, с увеличением числа которых происходит накопление погрешностей и т.д. При гибке точность в значительной степени обуславливается упругими и пластическими свойствами материала, определяющими величину упругих деформаций (упругого пружинения, выражаемого в угловом измерении) и вызывающими у изготовленных деталей погрешности линейных размеров [8].

Для оценки угла пружинения проведены сравнительные испытания деталей из сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м, уголгиба составлял $\alpha = 0,52$ рад. Опытные образцы изготавливались с локальным лазерным отжигом местагиба по разработанной схеме. Контрольные образцы изготавливались из материала той же партии, их гибка осуществлялась по базовой технологии с одной установкой гибочного приспособления. В результате проведенных испытаний угол пружинения образцов без лазерного отжига местагиба имел значение $5,2 \cdot 10^{-2}$ рад, с локальным лазерным отжигом местагиба – 2,8 (2,6...3,0). Применение локального лазерного отжига обеспечивает снижение угла пружинения при гибке деталей из низколегированного титанового сплава на 40...50 %.

Проводилось сравнение усталостной прочности деталей, изготовленных по серийной технологии и с применением лазерного отжига. Испытания осуществлялись по первой форме колебаний свободной детали методом ступенчатого нагружения при температуре $T = 293$ К, база испытаний состав-

ляла $n_0 = 5 \cdot 10^6$ циклов. Сравнение выявило, что образцы деталей, изготовленных с применением лазерного отжига, не уступают серийным.

Формирование зоны отжига переменной ширины предоставляет возможность штамповки деталей с переменным радиусомгиба. Перспективно применение в специализированном оборудовании совмещения газолазерной резки и формоизменяющих операций с технологической операцией лазерного местного подогрева. Схемы напряженного и деформированного состояний при различных формоизменяющих операциях различны, однако предложенный подход к разработке комбинированных технологических процессов совмещения операций лазерного отжига и штамповки можно с достаточной определенностью распространить на операции вытяжки, обжима, раздачи, формовки и т.д. Титановые сплавы применяют для изготовления рабочих лопаток осевых компрессоров газотурбинных двигателей. Известно, что равноосная глобулярная структура титановых сплавов обеспечивает максимальную выносливость, а структура игольчатого типа – максимальную жаропрочность. Создание структур в зависимости от назначения и условий работы деталей может быть дополнительным резервом повышения их надежности.

Применение лазерного отжига для местного разупрочнения перед формообразованием заготовок из металлических сплавов позволяет повысить точность изготовления деталей, уменьшить пружинение и радиусыгиба. Межоперационный отжиг для снятия наклепа у сплавов, имеющих низкую степень критической деформации, также целесообразно проводить с применением лазерного нагрева. Ширина зоны отжига заготовки и ее расположение определяется точностью выполнения формоизменяющих операций и условием протекания деформации разрушения. Заданная ширина зоны обработки не может быть получена любым из способов местного нагрева кроме лазерного, поскольку они при передаче тепла не обладают высокой плотностью энергии.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования условий снятия наклепа и образования рекристаллизованной структуры с помощью лазерного нагрева, которые показали возможность протекания этих процессов в диапазоне температур рекристаллизации (для сплава ОТ4-1: $T_p = 990...1110$ К, а для сплава ОТ4: $T_p = 1030...1130$ К). Определены параметры режима обработки: мощность лазерного излучения $Q = 450 \pm 5$ Вт; скорость обработки $v = 0,6 \pm 0,01$ м/с. Зона отжига имеет зернистую структуру, представленную α -фазой и небольшим количеством β -фазы. При лазерном отжиге происходит рекристаллизация деформированной структуры, а также распад метастабильных фаз с образованием стабильной рекристаллизованной структуры.

Применение лазерного отжига обеспечивает повышение предельного относительного удлинения на 10...15 %, увеличение предельного угла изгиба при холодном деформировании листовых деталей из низколегированных титановых сплавов ОТ4 и ОТ4-1 на 50...60 %, что предоставляет возможность проводить их формообразование без дополнительного подогрева. Применение локального лазерного отжига обеспечивает снижение угла пружинения при гибке деталей из низколегированного титанового сплава на 40...50 %.

References

1. **Bratukhin, A.G.** Titanium airplane constructions production engineering / A.G. Bratukhin [and other] – Moscow: “Mashinostroyeniye” (Mechanical engineering), 1995. – 448 p. – [in Russian].
2. **Colachev, B.A.** Titanium alloys in the design and manufacture of air-engines and aerospace equipment / B.A. Colachev [and other]; Edited by A.G. Bratukhin. – Moscow: Publishing house of MAI, 2001. – 412 p. – [in Russian].
3. **Bratukhin, A.G.** Blanking, welding,

Библиографический список

1. **Братухин, А.Г.** Технология производства титановых самолетных конструкций [Текст] / А.Г. Братухин [и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
 2. **Колачев, Б.А.** Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической технике [Текст] / Б.А. Колачев [и др.], под ред. А.Г. Братухина. – М.: Издательство МАИ, 2001. – 412 с.
 3. **Братухин, А.Г.** Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиационной промышленности [Текст] / А.Г. Братухин [и др.], под ред. А.Г. Братухина. – М.: Машиностроение, 1997. – 600 с.
 4. **Soifer, V.A.** Methods for computer design of diffractive optical elements [Текст] / Ed. by V.A. Soifer. – New York: J. Wiley and Sons Inc., 2002. – 784 p.
 5. **Murzin, S.P.** Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics [Текст] / S.P. Murzin // Journal of Advanced Materials. – 2003. – V. 10, №2. – P. 181-185.
 6. ГОСТ 1497 – 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст] – Введ. 1986-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 35 с.
 7. ГОСТ 11701 – 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент [Текст] – Введ. 1986-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 11 с.
 8. **Романовский, В.П.** Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. 1979. – 520 с.
- solder and heat treatment of titanium and its alloys in aircraft industry / A.G. Bratukhin [and other]; Edited by A.G. Bratukhin. – Moscow: “Mashinostroyeniye” (Mechanical engineering), 1997. – 600 p. – [in Russian].
4. **Soifer, V.A.** Methods for computer design of diffractive optical elements / Ed. by V.A. Soifer. – New York: J. Wiley and Sons Inc., 2002. – 784 p.
 5. **Murzin, S.P.** Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics / S.P. Murzin // Journal of Advanced Materials. – 2003. – V. 10, №2. – P. 181-185.

6. GOST 1497 – 84. Metals. Methods of stretching tests – Intr. 1986-01-01. – Moscow: Standards publishing house, 1984. – 35 p. – [in Russian].

7. GOST 11701 – 84. Metals. Stretching tests methods of light sheets and belts – Intr. 1986-01-01. – Moscow: Standards publishing

house, 1984. – 11 p. – [in Russian].

8. **Romanovskiy, V.P.** Reference book by cold forming [Text]/V.P. Romanovskiy. – 6th issue, remaked and suppl. – Leningrad: “Mashinostroyeniye” (Mechanical engineering), 1979. – 520 p. – [in Russian].

SOFTENING OF HALF-FINISHED PRODUCTS FROM TITANIC LOW-ALLOY BY LASER ANNEAL

©2008 S.P.Murzin, V.I.Tregub, A.V.Mezhenin, E.L. Osetrov

Samara State Aerospace University

Experimental researches of cold work's removal and formation recrystallized structures conditions by laser heating have shown an opportunity of passing these processes in a range of recrystallization temperatures titanic low alloys. Researches properties of the processed materials have shown that laser anneal application for local softening before shaping of half-finished products from metal alloys allows to increase accuracy of manufacturing of details, to reduce springing and bending radiuses.

Softening, low alloy, laser annealing, shaping, springing, bending radius, work hardening, recrystallizational structure

Сведения об авторах:

Мурзин Сергей Петрович, профессор, д.т.н., доцент, ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева», murzin@ssau.ru, взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии.

Трегуб Валерий Иванович, доцент, к.т.н., ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева», murzin@ssau.ru, авиационное материаловедение.

Меженин Андрей Викторович, аспирант, ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева», murzin@ssau.ru, взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии.

Осетров Евгений Леонидович, студент, ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева», murzin@ssau.ru, взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии

Murzin Serguey Petrovich, professor, Dr. Sci. Tech., reader, SEE HVT «S.P. Korolev Samara State Aerospace University», murzin@ssau.ru, interaction of laser radiation with matter, nanotechnology.

Tregub Valeriy Ivanovich, reader, Cand. Sci. Tech., SEE HVT «S.P. Korolev Samara State Aerospace University», murzin@ssau.ru, aircraft material engineering.

Mezhenin Andrey Victorovich, post-graduate, SEE HVT «S.P. Korolev Samara State Aerospace University», murzin@ssau.ru, interaction of laser radiation with matter, nanotechnology.

Osetrov Evgeniy Leonidovich, student, SEE HVT «S.P. Korolev Samara State Aerospace University», murzin@ssau.ru, interaction of laser radiation with matter, nanotechnology.