УДК 621.73.016+62-758.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-8-243-19-22

*Ц. А. Батуев, Э. Ц. Галсанова, А. Д. Грешилов***ОБОСНОВАНИЕ НАИБОЛЕЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ ОКОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА****Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления**

E-mail: erjena_g@mail.ru

Исследовано влияние технологических параметров горячей листовой штамповки на формообразование деталей из титанового сплава – оковок для накладок винта вертолета.

Показано, что наиболее подходящим методом для изготовления таких деталей является горячая штамповка с предварительным нагревом. При этом основным технологическим требованием становится равномерность нагрева, необходимость исключить перемещение нагретых заготовок, а также негативные превращения в материале на микро- и макроуровнях.

Ключевые слова: титановый сплав, горячая листовая штамповка, радиационный нагрев.

*C. A. Batuev, E. C. Galsanova, A. D. Greshilov***SUBSTANTIATION OF MOST RATIONAL TECHNOLOGICAL
FACTORS INFLUENCING THE FORMATION PROCESS DURING
HOT SHEET STAMPING OF THE TITANIUM ALLOY FRAME****East Siberian State University of Technology and Management**

The influence of the technological parameters of hot sheet stamping on the shaping of parts made of titanium alloy - forgings for helicopter screw linings is investigated.

It is shown that the most suitable method for the manufacture of such parts is hot stamping with preheating. At the same time, the main technological requirement is the uniformity of heating, the need to exclude the movement of heated workpieces, as well as negative transformations in the material at micro and macro levels.

Keywords: titanium alloy, hot stamping, radiation heating.

Введение

В качестве противоабразивных накладок, защищающих передние кромки несущего винта вертолета в условиях песчаных и пыльных бурь, используют оковки из листового титанового сплава ОТ4-1 [1]. Титановый сплав имеет плотность меньше, а ударную вязкость выше, чем у нержавеющей стали, поэтому широко применяется в авиастроении наряду с дюралем и магниевыми сплавами, занимая свою особую нишу. К недостаткам титана относят высокую стоимость, низкую теплопроводность, высокую химическую активность при нагреве, приводящую к возникновению остаточных внутренних напряжений в оковках, окисление и газонасыщение титановых сплавов; плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием титана на многие материалы, высокая склонность титана и многих его сплавов к водородной хрупкости и солевой коррозии, плохая обрабатываемость резанием, склонность к росту зерна при высокой температуре и фазовые превращения при сварочном цикле, затрудняющие сварку титана.

Требования, предъявляемые к оковкам для накладок винта вертолета [2]:

- материал детали ОТ4-1;
- профиль в поперечном сечении, согласованный с теорией лопасти (рис. 1);
- отклонения от теоретического контура должно быть не более 0,5 мм;
- отклонение лепестков от перпендикуляра к хорде допускается не более 1 мм;
- непрямолинейность оковки в согнутом виде не более 0,3 мм (рис. 1);
- оковка с внутренней стороны должна подвергаться пескоструйной обработке (разрешаемый вариант – травление);
- не допускается образование газонасыщенного (охрупченного слоя) на поверхности оковки.

Целью работы является обоснование выбора метода обработки металла давлением и обоснование параметров, входящих в математическую модель, описывающую напряженно деформированное состояние материала в каждой точке.

Рис. 1. Виды отклонений от профиля и расположения поверхностей оковки

Решение поставленной цели возможно при решении следующих задач:

- 1) исследование свойств материала;
- 2) исследование технологических факторов;
- 3) обоснование параметров, входящих в математическую модель, описывающую напряженно деформированное состояние материала в каждой точке.

Анализ и обоснование технологических параметров

Изготовление заготовок из листового титанового сплава ОТ4-1 осуществляется методом обработки металлов давлением, так как другие методы изготовления, например, литьем или сваркой, не применимы вследствие технологических свойств материала и требований, предъявляемых к оковкам (накладкам на винт).

Существует два основных способа получения заготовок из листового титанового сплава: холодная и горячая листовая штамповка, при которых листовой материал деформируется в холодном или нагретом состоянии в зависимости от температуры и скорости. Холодная листовая штамповка металла сопровождается интенсивным упрочнением (наклепом) с образованием больших остаточных напряжений. Зерна в сплаве приобретают вытянутую форму, а металл – строчечную структуру. Прочность металла в результате холодной деформации резко увеличивается, а пластичность существенно уменьшается. Холодная листовая штамповка осуществляется при температурах ниже температуры возврата и часто используется для получения деталей с особыми физико-механическими свойствами. В случае применения данного метода применяют дополнительную операцию – межоперационный отжиг, которая значительно снижает производительность изготовления оковок и повышает их стоимость. Листовая штамповка заготовок сложной формы из титанового сплава ОТ4-1 имеет недостатки, наиболее проявляющиеся при деформировании без подогрева [3; 4]:

1. Высокий предел прочности и близкий к нему предел текучести титановых сплавов определяет узкий диапазон пластического деформирования и высокое пружинение (значительные остаточные деформации) материала.

2. Низкая пластичность титановых сплавов при комнатной температуре (примерно в 2 раза меньше, чем у коррозионностойких сталей).

3. Относительно низкий модуль упругости титановых сплавов (примерно в 2 раза меньше, чем стали) [5]. Как следствие этого – пружинение деформируемого металла и коробление после штамповки.

Большое количество деталей сложной формы из труднодеформируемых материалов, в том числе противоабразивные оковки (накладки) для лопастей вертолета, изготавливается методом горячей штамповки.

При горячей листовой штамповке упрочнение, получаемое металлом в момент деформации, полностью снимается рекристаллизацией (разупрочнением), металл получает равноосную микроструктуру зерен. Размеры зерен в основном будут зависеть от температуры конца обработки давлением и степени деформации.

Таким образом свойства металла и требования к оковкам обуславливают выбор способа получения заготовок.

Основной недостаток заготовок, получаемых данным способом, пружинение вследствие повышенного значения отношения предела текучести к модулю упругости [6].

Обзор наиболее применяемых методов расчета пружинения показывает, что пружинение можно представить в виде $\Delta\gamma$ – соотношения заданного радиуса к радиусу детали, $\Delta\alpha$ – разницы между угламигиба и угла после разгрузки, σ – остаточным напряжением после разгрузки, или величиной отклонения Δ_n – разности между теоретическим контуром и фактическим профилем оковки в крайних точках оковки рис. 2.

Рис. 2. Схема определений величины отклонения оковки от теоретического профиля

Абсолютное значение $\Delta_{\text{п}}$ определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{п}} = \Delta_{\text{лев}} + \Delta_{\text{прав}}, \quad (1)$$

где значения в формуле Δ подставляются с знаками плюс (+) или минус (–): знак плюс – фактический профиль оковки больше (шире) теоретического профиля, минус – фактический профиль оковки меньше (уже) теоретического профиля.

Эффективность выполнения штамповки зависит от штампуемости металла, которая обеспечивается технологическими свойствами металла, и определяется его механическими, физическими и другими свойствами и характеристиками, а также конструкторскими факторами, такими как совершенство схемы действия и конструкции штампа, способы интенсификации процесса деформации и т. д.

Показателями штампуемости [7] являются пружинение, минимальный радиус изгиба, степень изменения качества поверхности от деформации при изгибе. Пружинение прямо про-

порционально отношению предела текучести к модулю упругости, поэтому чем меньше предел текучести, тем лучше штампуемость. Чтобы получить заданную точность гибки, пружинение учитывают корректировкой размеров пуансона и матрицы и настройкой штампа. Такая корректировка эффективна, если предел текучести и отклонение его по толщине металла достаточно стабильны. Минимальный радиус изгиба зависит от пластичности металла, т.е. от величины ϵ_p , так как формоизменение ограничивается разрушением металла на выпуклой поверхности изогнутого участка. Если металл имеет грубую микроструктуру, крупную и неравномерную зернистость, то при изгибе, вследствие большой пластической деформации поверхностных слоев, может существенно ухудшаться микрогеометрия поверхности. При исследовании существующих схем нагрева наблюдается существенный разброс температур по листу, представленный на рис. 3, что вызывает нестабильность предела текучести и изменение микроструктуры.

Рис. 3. Термограммы, полученные при исследовании существующих схем нагрева титановых заготовок перед горячей штамповкой

Таким образом, величину пружинения можно выразить как функцию, зависящую от технологических факторов, влияющих на процесс формообразования.

Важнейшим технологическим фактором, определяющим выбор термомеханических режимов, является технологическая пластичность металла в условиях обработки. Элементарный объем металлического тела переходит из упругого состояния в пластическое, когда напряжения достигают предела текучести. Предел текучести выражается S_d сопротивлением деформации при линейном напряженном состоянии в условиях, соответствующих температуре, степени и скорости деформации.

В таблице приведены значения сопротивления деформации при различной температуре [6]. При изменении температуры от 700 до 800 °C наблюдается значительный скачок сопротивления деформации. Это указывает на то, что неравномерность при нагреве по листу даст значительный градиент напряжений.

Значения сопротивления деформации $S_{d \max}$ сплава ОТ4-1 при различной температуре

$t, ^\circ\text{C}$	$S_{d \max}, \text{МПа, при } \varepsilon, \text{с}^{-1}$				
	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2
700	123		277	301	308
800	55		114	143	164
900	23	—	41	65	76
1000	16		26	35	46
1100	12		21	27	40

Также в исследованиях [8] показано, что для сплава ОТ4-1 температура является фактором в большей степени определяющим значения удлинения и влияющим на напряжения, чем скорость деформации.

Выводы

Поэтому основной задачей обеспечения заданной точности гибки после рационального выбора термомеханических режимов процесса деформирования является обеспечение как можно более равномерного нагрева по поверхности листа заготовки и ее объему. В силу малости толщины заготовки для накладки винта вертолета (менее 1 мм) неравномерностью по объему можно пренебречь, в то время как задача равномерного нагрева по поверхности листа заготовки становится крайне существенной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 22178–76. Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия (с Изменениями N 1–5). – М.: Стандартинформ, 2005. – 27 с.
2. Грешилов, А. Д. Разработка технологии гибки титановых противоабразивных оковок с применением радиационного нагрева / А. Д. Грешилов, Ю. Л. Шурыгин, Ю. П. Хараев // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 73–74.
3. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л. А. Никольский, С. З. Зиглин, В. В. Бойцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
4. Аналитические зависимости для определения сопротивления деформации титановых сплавов / С. В. Харитонин, В. И. Степаненко, К. И. Литвинов и др. // Кузнечно-штамповое производство. – 1994. – № 11. – С. 5–6.
5. Сторожев, М. И. Теория обработки металлов давлением / М. И. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
6. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учеб. пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 10.
7. Ковка и штамповка : справочник. В 4 т. Ред. совет: Е. И. Семенов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Холодная объемная штамповка / под ред. Е. И. Семенова, 1985. – 568 с.
8. Омар Ахмед Омар Мослех. Сверхпластическая деформация титановых сплавов с разной исходной микроструктурой : дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 : защищена 2019 г. / Омар Ахмед Омар Мослех. – Москва, 2019. – 207 с.