

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

© 2011 С. Ф. Глушенко, А. Н. Первышин

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

Рассмотрены вопросы установления оптимальных фазового состава и структуры, соотношения фаз титановых сплавов смешанной  $\alpha$ - $\beta$  структуры и  $\alpha$ -структуры, влияния термообработки на механические характеристики для обеспечения наиболее высоких характеристик механической обработки и качества изделий.

*Химсостав, деформация, термообработка, структура, механические характеристики, стойкость.*

Титан и его сплавы по оптимальности конструкционных свойств отличаются небольшой плотностью, высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Изготовление конструкций из титановых сплавов требует разработки ресурсосберегающих технологических процессов из-за их низкой теплопроводности, высокой химической активности, ограниченных возможностей холодной деформации и пониженной обрабатываемости резанием по сравнению со сталями. Наиболее перспективным направлением является изготовление из титановых сплавов штампованных конструкций из прогрессивных точных заготовок (профили, листы). Установление влияния деформации ковкой, штамповкой и листовой прокаткой, а также электроконтактного нагрева на свойства титановых сплавов в конструкциях является актуальной задачей. В зависимости от условий эксплуатации необходимо формирование структуры или  $\alpha$  – твёрдого раствора, или смешанной структуры  $\alpha + \beta$  твёрдого раствора.

Для обеспечения технологичности процессов обработки металлов давлением (ОМД) при условии приемлемых свойств в механической обработке в металлургических процессах Ti, кроме Al, дополнительно легируется такими  $\beta$ -стабилизаторами, как хром, молибден, марганец и др.

Установлено, что, например, не во всех случаях традиционные методы пластической деформации, сварки и термической обработ-

ки конструкций из сплава BT20 позволяют получать в них высокие показатели прочности и пластичности. Значительное улучшение свойств наблюдается у заготовок из сплава BT20 после окончательной объёмной штамповки в интервале температур фазового  $\alpha \rightarrow \beta$  - превращения. В полной мере реализуется прочность и пластичность в листовых штамповках из титанового сплава BT20 после электроконтактного нагрева в области фазового  $\alpha \rightarrow \beta$  - превращения и последующего охлаждения в металлическом штампе в процессе формообразования.

Исследования проведены на штампованных конструкциях из псевдо-  $\alpha$ -титанового сплава BT20 после различных видов штамповок и сварки.

Содержание примесей газов в исследованных полуфабрикатах не зависит от их вида и размера и соответствует требуемым техническим условиям на поставку. У максимального числа проверенных плавок содержание примесей составляло: водорода – 0,0045%, кислорода – 0,07% и азота – 0,03%. Содержание газовых примесей в сварных соединениях соответствует требованиям ОСТ 1.90013-81 и для большинства их составляет: водорода – 0,0025%, кислорода – 0,054%, азота – 0,032%.

Исследования микроструктуры проводились в соответствии с требованиями, предъявляемыми к металлографическому анализу титановых сплавов и в особенности

к изготовлению шлифов механической обработкой (резанием, шлифованием, полированием).

Исследованию подвергались поковки одного типоразмера и одной и той же плавки после нескольких переходовковки, штамповки, но с различной температурой окончательной штамповки на последнем переходе. Из поковок вырезались образцы в продольном, поперечном и высотном направлениях для механических испытаний, макро- и микроисследований. Перед испытаниями образцы отжигались при 850°C - 1 ч для снятия остаточных напряжений после окончательной штамповки.

Оценка механических свойств полуфабрикатов из сплава ВТ20 показывает, что чем меньше толщина заготовки (листа, поковки, плиты, штамповки), тем выше временное сопротивление разрыву. Пластичность зависит от вида заготовок: например, у штамповок она выше, чем у поковок. Повышение прочностных характеристик полуфабрикатов из сплава ВТ20, как известно, связано с накоплением в них дефектов кристаллического строения в основном процессе пластической деформации (ковки, штамповки, прокатки). В зависимости от накопления количества дефектов кристаллического строения изменяется и временное сопротивление разрыву заготовок из сплава ВТ20 от 900 до 1280 МПа при удовлетворительных характеристиках пластичности.

Анализируя изменения механических свойств сварных соединений, можно качественно отметить, что как толщина свариваемых заготовок, так и вид сварки оказывают существенное влияние на накопление дефектов кристаллического строения и в конечном итоге на их свойства. Это в значительной степени обусловлено условиями поглощения водорода, кислорода и азота в процессе сварки, а также различным структурообразованием в зависимости от температурного режима сварки. В общем случае получение качественного шва с последующей его обработкой и обеспечением требуемых эксплуатационных свойств в большей или меньшей степени затруднено в зависимости от условий сварки вследствие потери металлом пла-

стичности и появлением свойств хрупкости самого сварного шва.

Установлено, что наиболее высокие характеристики прочности и пластичности имеют листовые сварные соединения, наименьшие – штампосварные заготовки после электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

Результаты исследований влияния температуры окончательной штамповки на свойства титановых заготовок показали, что наилучшие механические свойства наблюдаются у заготовок, подвергавшихся окончательной штамповке в температурной области существования  $\alpha$ -фазы, близкой к температуре  $\alpha \rightarrow \beta$  - превращения. Временное сопротивление разрыву у таких штамповок повысилось на 8 – 10% , а характеристики пластичности – в 1,5 – 2 раза по сравнению со штамповками, деформированными в области существования  $\beta$ -фазы. Кроме того, у штамповок, деформированных в области  $\alpha$ -фазы, наблюдается стабильность, небольшой разброс и меньшая зависимость механических свойств от условий испытания.

Установлено большое разнообразие микроструктур, зависящих от температуры окончательной штамповки. Если деформация проводится в температурном интервале существования  $\beta$ -фазы, то образуется пластичная ( $\beta$ -превращённая) структура с чётко выраженными зёрнами исходной  $\beta$ -фазы, окаймлёнными  $\alpha$ -фазой. Причем  $\beta$ -зёрна состоят из  $\alpha$ -колоний, являющихся пачками  $\alpha$ -пластин, разделённых прослойками  $\beta$ -фазы. Такая структура и определяет пониженные характеристики и прочности, и пластичности, а также значительную их нестабильность.

Деформация при температуре существования  $\alpha$ -фазы, близкой к температуре полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$  - превращения, приводит к тому, что явных границ зёрен  $\beta$ -фазы не наблюдается. Полученная структура характеризуется пластинчатым строением внутризёренной  $\alpha$ -фазы с переходом к глобулярной, т.е. к образованию структуры, связанной с процессами рекристаллизации, коагуляции и глобуляризации.

При последеформационном отжиге титановых заготовок происходит уменьшение

количества дефектов кристаллического строения в объеме металла, что вызывает повышение пластичности и снижение прочности. Высоким показателям прочности соответствуют предельно низкие значения пластичности, что не позволяет в полной мере реализовать прочность, которой обладает псевдо- $\alpha$ -сплав.

Вследствие теплового расширения металла при электроконтактном нагреве, проведенном с целью уточнения температуры полиморфного превращения, заготовка сплава ВТ20, закреплённая в зажимах, начинает упруго выгибаться. Величина прогиба заготовки увеличивается пропорционально повышению её температуры. При достижении заготовкой температуры 970°C наступает остановка роста прогиба, а затем его резкое уменьшение, т.е. происходит свободное провисание заготовки под собственным весом. Температура 970°C, при которой заготовка из сплава ВТ20 свободно провисает, оказалась температурой полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$  - «предпревращения».

В момент свободного провисания заготовка подвергалась охлаждению в штампе. Электроконтактный нагрев заготовок из сплава ВТ20 до температуры полиморфного предпревращения и охлаждение в металлическом штампе по сравнению с традиционными методами штамповки приводят к повышению временного сопротивления разрыву ( $\sigma_b$ ) на 11%; предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) на 9%; относительного удлинения ( $\delta$ ) на 5%, угла загиба ( $\alpha$ ) на 15%; сопротивления малоциклового усталости (МЦУ) на 7%. Существенно снижается и содержание газовых примесей ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ).

Как видно из данных таблицы 1, при использовании электроконтактного нагрева оказалось возможным в полной мере реализовать прочность и пластичность в листовых штамповках, присущую псевдо- $\alpha$ -титановому сплаву ВТ20.

Это обусловлено тем, что тепловое воздействие на металл в интервале температур предпревращения приводит к максимальной диффузионной подвижности атомов, и в этих условиях протекают многоуровневые релаксационные процессы.

Исследование связи изменений кристаллографической текстуры с эволюцией микроструктуры при горячей пластической деформации цилиндрических образцов из двухфазного титанового сплава ВТ9 в процессе одноосного растяжения, кручения и кручения с одновременным растяжением в условиях сверхпластичности показали, что после пропорционального нагружения формирования металлографической текстуры не происходит (табл. 2).

Однородность зёрен по размеру во всем деформируемом объеме образцов выше, чем в исходном материале заготовок. Средний размер зёрен ( $d = 3,9 - 4,1$  мкм) практически одинаков в центре и на периферии образцов.

Обрабатываемость титановых сплавов резанием существенно зависит от типа и параметров микроструктуры. Общеизвестно, что титановые сплавы с грубой пластинчатой структурой значительно хуже обрабатываются резанием, чем сплавы с тонкопластинчатой или глобулярной структурами. Единого мнения о влиянии параметров микроструктуры на обрабатываемость резанием нет, что, по-видимому, обусловлено большим разнообразием сочетаний различных структурных составляющих с разными размерами и формой.

Эффективным способом улучшения обрабатываемости титановых сплавов резанием является механоводородная обработка (МВО), состоящая из наводороживания, собственно механической обработки наводороженного материала и вакуумного отжига.

В качестве объектов исследования были выбраны титановые сплавы разных классов: технический титан ВТ1-0,  $\alpha$ -сплавы ВТ5-1, ВТ5Л, псевдо- $\alpha$ -сплавы ВТ20, ВТ20Л, ( $\alpha + \beta$ )-сплавы ВТ6, ВТ8, ВТ25, ВТ3-1, ВТ23. Исходный материал для исследования - горячедеформированные прутки промышленной поставки.

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии изучались обрабатываемость резанием прутков сплавов ВТ6, ВТ3-1, ВТ23 после отжига, закалки и старения. Термическая обработка прутков осуществлялась в печах сопротивления с воздушной атмосферой.

Таблица 1. Механические свойства сплава ВТ20 после скоростного нагрева на воздухе и формообразования

| Состояние<br>испытываемых<br>образцов                                                                               | $\sigma_B$               | $\sigma_{0,2}$           | $\delta, \%$       | $\alpha, ^\circ$   | Число<br>циклов до<br>разрушения<br>(N) при<br>$\sigma_a^{cp} = =$<br>$\frac{(0,75\sigma_B - 0,49\sigma_B)}{2}$ | Содержание<br>газов, % |                |                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|----------------|
|                                                                                                                     | МПа                      |                          |                    |                    |                                                                                                                 | H <sub>2</sub>         | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| Исходный<br>отжиг при<br>650°C,<br>1 ч                                                                              | 1080                     | 1030                     | 12                 | 38                 | -                                                                                                               | 0,0081                 | 0,085          | 0,021          |
| Холодная<br>прокатка                                                                                                | 1130                     | 1090                     | 7                  | 34                 | -                                                                                                               | -                      | -              | -              |
| Холодная<br>прокатка, отжиг<br>при<br>650°C, 1 ч                                                                    | 1130                     | 1080                     | 9                  | 36                 | -                                                                                                               | 0,0085                 | 0,098          | 0,020          |
| Холодная<br>прокатка, отжиг<br>при<br>860°C, 1 ч                                                                    | 1050                     | 980                      | 11                 | 38                 | -                                                                                                               | 0,0087                 | 0,090          | 0,023          |
| Электроконтакт-<br>ный нагрев до<br>920°C,<br>охлаждение в<br>металлической<br>матрице,<br>отжиг при<br>650°C, 1 ч  | 1050                     | 980                      | $\frac{10-13}{12}$ | $\frac{35-43}{41}$ | -                                                                                                               | 0,0089                 | 0,085          | 0,033          |
| Электроконтакт-<br>ный нагрев до<br>920°C,<br>охлаждение в<br>металлической<br>матрице                              | 1260                     | 1210                     | 18                 | 44                 | -                                                                                                               | 0,0096                 | 0,093          | 0,029          |
| Электроконтакт-<br>ный нагрев до<br>960°C,<br>охлаждение в<br>металлической<br>матрице,<br>отжиг при<br>650°C, 1 ч  | $\frac{1240-1270}{1250}$ | $\frac{1180-1210}{1190}$ | $\frac{14-18}{16}$ | $\frac{44-48}{46}$ | $\frac{237000-263000}{255000}$                                                                                  | 0,0096                 | 0,093          | 0,029          |
| Электроконтакт-<br>ный нагрев до<br>1020°C,<br>охлаждение в<br>металлической<br>матрице, отжиг<br>при<br>650°C, 1 ч | $\frac{1100-1130}{1110}$ | $\frac{1030-1080}{1050}$ | $\frac{10-12}{11}$ | $\frac{36-42}{40}$ | $\frac{215000-234000}{222000}$                                                                                  | 0,0112                 | 0,117          | 0,039          |

Примечание: В числителе приведены максимальные и минимальные значения механических свойств, в знаменателе - средние значения семи испытанных образцов

Во второй серии экспериментов, проведенных на всех указанных выше сплавах, прутки сначала подвергались вакуумному отжигу. Затем часть образцов наводороживалась при 750-850°C до различного содержа-

ния водорода (максимальная концентрация – 0,2%). В исходном деформированном состоянии содержание водорода составляло 0,005%, после вакуумного отжига – 0,003%.

Таблица 2. Размер зёрен и содержание  $\alpha$ -фазы в сплаве ВТ9 в зависимости от вида нагружения

| Вид нагружения        | d, мкм   | $\alpha$ , % |
|-----------------------|----------|--------------|
| Исходное состояние    | 3,0/3,0  | 55/55        |
| Одноосное растяжение  | 3,7/ 9,3 | 48/48        |
| Кручение              | 3,9/4,8  | 50/52        |
| Растяжение + кручение | 3,9/4,1  | 49/52        |

Примечания.

1. В числителе даны размер зёрен d ( в продольном направлении) и содержание  $\alpha$ -фазы в центре образца, в знаменателе - у края образца.
2. Деформирование проводилось при  $t_{\text{деф}} = 950^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ .

Распределение водорода по сечению образцов оценивалось спектральным методом.

Экспериментальные исследования проводились с использованием металлографического и рентгеноструктурного анализов. Размер структурных составляющих определялся методом секущих.

Основными оценочными параметрами обрабатываемости резанием, которые определялись в процессе экспериментов, были следующие: температура в зоне резания, усилия резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , износ резцов по задней поверхности  $h_z$ , стойкость резцов при фиксированном износе T, удельная размерная стойкость  $T_{\text{ур}}$ . В качестве режущего инструмента использовались резцы из твёрдых сплавов ВК8 и ВК6,  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $h_z$  – износ по задней поверхности резца, мм.

Увеличение размера зерна в 2 раза (от 200 до 400 мкм) приводит к снижению стойкости T от 204 до 126 мин при скорости резания 25 м/мин, т.е. в 1,7 раза (рис. 1). Роль остальных факторов менее значительна: увеличение толщины  $\alpha$ -пластин от 1 до 2 мкм сопровождается снижением стойкости в 1,2 раза.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что в наибольшей степени на обрабатываемость резанием (стойкость резцов) сплавов ВТ6 и ВТ23 после термической обработки влияет размер зерна, а внутризёренное строение оказывает меньшее влияние.

Введение в титановые сплавы водорода приводит к существенным структурным изменениям, в том числе в ряде случаев к измельчению зерна. Исходная структура ис-

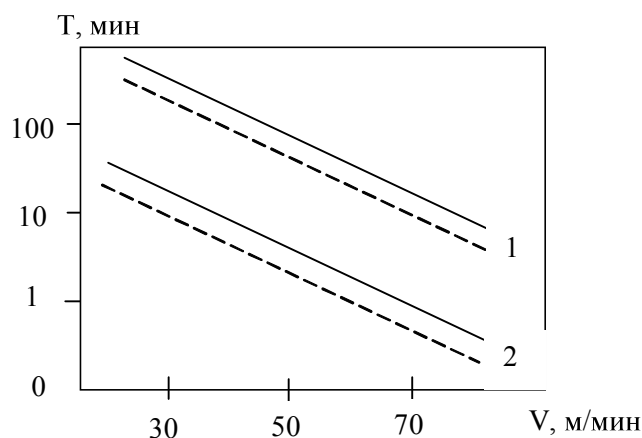


Рис. 1. Зависимость стойкости T резца ВК8 от скорости резания при точении сплава ВТ6 с различным размером  $\beta$ -зерна. Режимы резания: 1 –  $S=0,1$  мм/об;  $t=0,5$  мм; 2 –  $S=0,2$  мм/об;  $t=1,0$  мм;  $h_z=0,3$  мм; сплошные линии –  $D_\beta=200$  мкм; штриховые линии –  $D_\beta=400$  мкм

следованных титановых сплавов была грубой пластинчатой. Легирование водородом вызвало преобразование внутризеренного строения без измельчения исходного  $\beta$ -зерна. В зависимости от содержания водорода и температуры наводороживания может происходить формирование тонкопластинчатой, глобулярной или смешанной структуры. При этом размеры структурных составляющих могут изменяться в широких пределах, например, толщина  $\alpha$ -пластин – от  $\sim 0,5$  до  $\sim 8$  мкм.

На основе обобщения экспериментальных данных были установлены оптимальные фазовый состав и структура, а также количество  $\beta$ -фазы, при которых наблюдаются наиболее высокие характеристики обрабатываемости резанием различных титановых сплавов, легированных водородом. В таблице 3 приведены значения коэффициента парной линейной корреляции  $r$  и коэффициента нелинейной корреляции  $\eta$ , на основе которых можно определить силу связи между характеристиками обрабатываемости резанием,

количеством  $\beta$ -фазы и толщиной  $\alpha$ -пластин.

Для всех исследованных материалов наилучшая обрабатываемость резанием наблюдается при мелкой структуре (тонкопластинчатой, мелкоглобулярной или смешанной). Самая сильная корреляция между удельной стойкостью резца  $T_{yp}$  и толщиной  $\alpha$ -пластин (глобулей) обнаружена для сплава ВТ20 ( $r = -0,96$ ) и ВТ23 ( $r = -0,95$ ); для всех остальных сплавов связь менее сильная ( $r = -0,53 \div 0,6$ ), но во всех случаях наблюдается повышение стойкости с уменьшением толщины  $\alpha$ -пластин или  $\alpha$ -глобулей.

Существует несколько причин, которые могли бы объяснить улучшение обрабатываемости резанием с уменьшением размера структурных составляющих или из-за преобразования пластинчатой структуры в глобулярную.

Пластинчатая структура обеспечивает меньшие характеристики пластинчатости, чем глобулярная структура. Одной из причин плохой обрабатываемости титановых спла-

Таблица 3. Оптимальные параметры и тип структуры титановых сплавов

| Сплав | $H_{opt}, \%$ | Оптимальный фазовый состав                             | Оптимальная структура | $\beta$ -фаза, % |             | $r_\beta(\eta)$ | $r_\alpha$ |
|-------|---------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-------------|-----------------|------------|
|       |               |                                                        |                       | исходная         | оптимальная |                 |            |
| ВТ1-0 | 0,1 – 0,3     | $\alpha + \delta$                                      | МЗ<br>ТП              | -                | -           | -               |            |
| ВТ5-1 | 0,45 – 0,55   | $\alpha + \delta$                                      | ТП                    | -                | -           | -               | - 0,58     |
| ВТ20  | 0,3 – 0,4     | $\alpha + \beta + (\delta)$                            | МП<br>МГ              | 5                | 30          | 0,95            | - 0,96     |
| ВТ6   | 0,3 – 0,4     | $\alpha + \beta + (\delta)$                            | ТП<br>СМ              | 11               | 30 – 40     | 0,3<br>(0,8)    | - 0,54     |
| ВТ8   | 0,2<br>0,7    | $\alpha + \beta + \delta$                              | МГ<br>СМ              | 12               | 40          | 0,74            | - 0,53     |
| ВТ25  | 0,3 – 0,5     | $\alpha + \beta$                                       | ТП<br>МГ              | 21               | 40 – 60     | 0,6             | - 0,58     |
| ВТ3-1 | 0,15 – 0,45   | $\alpha + \beta + \delta$<br>$\alpha + \beta + \delta$ | СМ<br>МГ              | 24               | 45 – 50     | 0,57            | - 0,58     |
| ВТ23  | 0,6 – 0,7     | $\alpha + \beta$                                       | ТП<br>МГ              | 35               | 50 – 60     | 0,4<br>(0,96)   | - 0,95     |

Обозначения:  $H_{opt}$  – оптимальное содержание водорода (температура наводороживающего отжига 800°C); МЗ – мелкозернистая структура; ТП – тонкопластинчатая структура; МГ – мелкоглобулярная структура; СМ – мелкая смешанная структура: пластинчатая + глобулярная;  $r_\beta$  и  $r_\alpha$  – коэффициенты парной линейной корреляции характеристик обрабатываемости резанием с количеством  $\beta$ -фазы и толщиной  $\alpha$ -пластин (глобулей) соответственно;  $\eta$  – (в скобках) – коэффициент нелинейной корреляции.

вов резанием считается его низкая пластичность. Вследствие этого при обработке титановых сплавов пластическая деформация не успевает протекать во всем объеме металла и концентрируется в контактном слое. В результате в этом слое возникают высокие давления и температуры, что обуславливает низкую обрабатываемость резанием титановых сплавов.

Более высокая пластичность при глобулярной структуре должна способствовать повышению обрабатываемости титановых сплавов резанием. В соответствии с теорией вязкости разрушения уменьшение размера зерна обрабатываемого материала сопровождается уменьшением критической длины трещины. Можно предположить, что поэтому стружкообразование начинается при меньших размерах макротрещины. Следовательно, для роста трещины будет требоваться меньшая работа разрушения при тех же напряжениях.

Ещё одной причиной улучшения обрабатываемости резанием из-за изменения структуры может быть снижение коэффициента трения между обрабатываемым материалом и материалом резца. Исследовалось контактное взаимодействие сплава ВТ9 с твёрдым сплавом ВК8. Образцы сплава ВТ9 были подвергнуты деформации по стандартному режиму и по режиму проявления сверхпластической деформации, когда формируется мелкозернистая структура, имею-

щая большую протяжённость межфазных границ, благоприятную для зерноограничительного проскальзывания дислокаций. Исследования обрабатываемости резанием показали, что после сверхпластической деформации наблюдается уменьшение сил резания, напряжений трения, адгезионной связи на срез и адгезионной составляющей коэффициента трения.

Благоприятные структурные изменения не являются единственной причиной улучшения обрабатываемости титановых сплавов резанием. Для оценки того вклада, который вносит структура в обрабатываемость титановых сплавов резанием, образцы сплава ВТ3-1 с исходной грубой пластинчатой структурой были подвергнуты следующей обработке: 1 – вакуумный отжиг при 800°C 10 ч; 2 – наводороживание до 0,5%Н при 800°C 10 ч; 3 – наводороживание до 0,5%Н при 800° и последующий вакуумный отжиг при 800°C 10ч. Результаты экспериментов показали, что вакуумный отжиг привёл к некоторому уменьшению сил резания и повышению стойкости инструмента (табл. 4).

Введение 0,5 % Н в сплав ВТ3-1 вызвало существенное снижение сил резания и увеличение стойкости инструмента. Последующий вакуумный отжиг ухудшил параметры обрабатываемости резанием сплава ВТ3-1, но они остались выше, чем в исходном состоянии ( в том числе и после вакуумного отжига).

Таблица 4. Характеристики обрабатываемости резанием сплава ВТ3-1 с различной структурой после отжига при температурах 750-1000°C

| Структура                                      | $T_{ур} \cdot 10^{-3}$<br>см <sup>2</sup> /мкм | $P_x$ | $P_y$ | $P_z$ |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                                |                                                | Н     |       |       |
| Грубая пластинчатая,<br>Крупное $\beta$ -зерно | 0,4 – 0,6                                      | 620   | 700   | 750   |
| Мелкопластинчатая ,<br>Крупное $\beta$ -зерно  | 0,5 – 0,7                                      | 610   | 650   | 730   |
| Мелкоглобулярная,<br>Крупное $\beta$ -зерно    | 1,5 – 2,5                                      | 600   | 670   | 750   |
| Мелкоглобулярная,<br>Мелкое $\beta$ -зерно     | 3 – 5                                          | 480   | 650   | 700   |

Обозначения:  $T_{ур}$  - удельная размерная стойка резца;  $P_x, P_y, P_z$  - силы резания.

Примечание. Параметры резания -  $V = 60$  м/мин;  $S = 0,21$  мм/об;  $t = 1,0$  мм.

Есть основания различать активное и пассивное действие водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием. При точении наводороженных образцов водород принимает активное участие в процессах резания, улучшая обрабатываемость из-за благоприятного изменения их характеристик непосредственно в зоне резания. К активно действующим факторам следует отнести влияние водорода на работу пластической деформации в зоне резания, удельную работу разрушения, тепловыделение и отвод тепла от зоны резания, силы трения инструмента с обрабатываемым материалом. Именно эти процессы определяют силы резания, температуру в зоне резания и, как следствие, стойкость инструмента. При пассивном действии благоприятная роль водорода сводится к измельчению структуры.

В вакуумированном металле действует только этот фактор. При резании мелкозернистого наводороженного металла его дисперсное строение усиливает благоприятное действие активных факторов. В связи с этим стойкость инструмента при точении наводороженного мелкозернистого сплава значительно больше, чем при точении вакуумированного сплава с аналогичной структурой.

В случае получения заготовок в условиях повышенного процентного содержания алюминия (до 30%) и воздействия на расплав факторов, способствующих быстрому заполнению формы и её вибрации с частотой до 70 Гц, механические свойства заготовок определяются структурой сплава в зависимости от его состава. Для снижения предела прочности и повышения пластичности таких сплавов перед механической обработкой не-

обходимо провести отжиг при температуре порядка 900° С для полного растворения частиц упорядоченной гексагональной  $\omega$ -фазы внутри прослоек  $\beta_0$  ( $B_2$ ) – фазы. При этом имеются ограничения в виде обеспечения б-структуры сплава для сохранения его высоких эксплуатационных свойств (хорошая свариваемость, устойчивость против коррозии и загрязнения газами, прочность при нагреве).

Анализ механизмов деформации сплавов в процессах обработки показывает зависимость структуры материалов заготовок от механизма деформации скольжением или двойникованием. Установлено, что степень пластической деформации связана с температурой старения в значительной степени в зависимости от характера границ первичных и вторичных мест зарождения  $\alpha$ -фазы, имеющей только четыре системы скольжения и малую толщину кристаллов, в микрообъёмах которой затруднено размножение решёточных дислокаций.

Характер такой зависимости представлен в таблице 5.

Таким образом, повышение свойств механической обработки титановых сплавов при значительных пластических деформациях связано как с получением заданного строения микроструктуры, так и со степенью её измельчения и условиями термообработки. Основная проблема при этом заключается в выборе таких условий и параметров деформации, когда в зависимости от химсостава формируется однородная фрагментированная структура с требуемым соотношением структурных элементов и их ориентацией в зависимости от способа обработки процессами ОМД и термообработки.

Таблица 5. Механические свойства деформированного  $\beta$ -сплава титана Ti – (45-51)%, Al, Nb, V, Mo

| T°С | t, час | Деформация, % | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_s$ , МПа | $\delta$ , % | KCV<br>МДж/м <sup>2</sup> |
|-----|--------|---------------|----------------------|------------------|--------------|---------------------------|
| 550 | 15     | 7             | 760                  | 870              | 1,2          | 0,19                      |
| 610 | 15     | 18            | 790                  | 910              | 1,0          | 0,23                      |

### Выводы

1. В результате пластической деформации (ковка, штамповка, прокатка) и сварки прочность заготовок из сплава повышается от 900 до 1280 МПа при предельно допустимых характеристиках, ниже которых использование их в конструкциях не рекомендуется. Отжиг титановых заготовок приводит к повышению их пластических характеристик и снижению прочностных.

2. Проведение окончательной штамповки заготовок из сплава ВТ20 в интервале температур фазового  $\alpha \rightarrow \beta$  предпревращения улучшает механические свойства штамповок: повышает и прочность, и пластичность.

3. Прочность и пластичность псевдо  $\alpha$ -титанового сплава в полной мере реализуется в штамповках после электроконтактного нагрева в области фазового  $\alpha \rightarrow \beta$  предпревращения и последующего охлаждения в металлическом штампе в процессе формообразования.

4. Обрабатываемость титановых сплавов резанием существенно улучшается с уменьшением величины  $\beta$ -зерна и измельчением внутризеренных структурных составляющих. Обратимое легирование титановых сплавов водородом способствует измельчению внутризеренного строения, а в ряде случаев и измельчению зерна, что вызывает улучшение обрабатываемости резанием.

5. Благоприятные структурные изменения, обусловленные водородным легированием, не являются единственным фактором улучшения обрабатываемости. Водород активно влияет на процессы, происходящие в зоне резания непосредственно в процессе обработки.

6. Для снижения основных механических характеристик с целью улучшения свойств мехобработки следует изменить мелкозернистую субмикроструктуру на крупнозернистую различной микроструктуры, что также оказывает влияние и на характер образования стружки.

### Библиографический список

1. Влияние режимов деформации и термической обработки на величину и распределение остаточных напряжений в штамповках из титановых сплавов/ Аношин Н. Ф., Брун М. Я., Быкова Л. А. и др. // Обработка легких и специальных сплавов. - М.: Изд-во ВИАЛС, 1996.

2. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов. - Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002.

3. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос, 2000..

4. Малышева С. П., Салищев Г. А., Галеев Р. М. и др. Особенности изменения структуры и механических свойств субмикроструктурного титана при деформации в интервале температур  $(0,15 - 0,45)T_{пл}$  // ФММ. - 2003. - Т. 95. - №4. - С. 98.

### References

1. Influence of deformation regimes and heat treatment on the amount and distribution of residual tension in titanium alloys during [Text] / N. F. Anoshin, M. Ya. Brown, L. A. Bikova [et. al.] // Processing of light and special alloys. - M.: Publishing House of All-Union Institute of Light Alloys, 1996.

2. Bogatov, A. A. Mechanical properties and models of metal fracture [Text] / A. A. Bogatov. - Ekaterinburg: Publishing House of Urals State Technical University, 2002.

3. Valiev, R. Z. Nanostructure materials obtained by intensive plastic deformation [Text] / R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov. - M.: Logos, 2000.

4. Malysheva, S. P. Peculiarities of changes in structure and mechanical properties of submicrocrystalline titanium under deformation at temperature interval  $(0.15-0.45) T_m$  [Text] / S. P. Malysheva, G. A. Salischev, R. M. Galeev [et. al.] // Fizika Metallov i Metallovedenie (The Physics of Metals and Metallography). - 2003. - Vol.95. - N.4. - PP. 98-105.

---

**FORMING OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM  
ALLOYS ACCORDING TO MECHANICAL PROPERTIES IN THE PROCESSES  
OF PLASTIC WORKING OF METALS**

© 2011 S. F. Tlustenko, A. N. Pervyshin

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

The paper deals with the problems of determining optimal phase composition and structure, the proportion of phases of titanium alloys of mixed  $\alpha$ - $\beta$  and  $\alpha$  structures, as well as the influence of heat treatment on the mechanical characteristics for providing improved characteristics of mechanical treatment and the quality of products.

*Chemical composition, deformation, heat treatment, structure, mechanical characteristics, resistance.*

**Информация об авторах**

**Тлустенко Станислав Федотович**, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Область научных интересов: разработка теории автоматизации прокатного производства, построение алгоритмов оптимального управления.

**Первышин Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Область научных интересов: изучение процессов механической обработки материалов, формирование свойств исходных заготовок по оптимальным режимам обработки.

**Tlustenko Stanislav Fedotovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Area of research: analysis of the processes of mechanical treatment of materials, the influence of the kind of process of metal plastic working on the properties of blanks and the improvement of the quality of materials.

**Pervyshin Alexander Nikolayevitch**, doctor of technical science, professor, head of the department of material mechanical development, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Area of research: analysis of the processes of mechanical treatment of materials, forming the properties of initial blanks according to optimal treatment conditions.