

УДК 669.295; 621.431.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2012 Ф. В. Гречников, С. Ф. Тлустенко

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

Представлены результаты формирования структуры сортамента из титана технической чистоты в зависимости от крупнозернистого или наноструктурного состояния для обеспечения механических свойств получаемых различными способами деталей сборок. Изучена структура титана в зависимости от условий и характера наводораживания при механической обработке. Установлено влияние отдельных режимов нагрева и технологической деформации заготовок на формирование текстуры и на колебания механических свойств металла по его площади и толщине.

Деформация, структура, прочность, пластичность, вязкость, обрабатываемость, формообразование.

В настоящее время актуальными являются задачи повышения качества конструкционных материалов для агрегатно-сборочного производства (АСП) летательных аппаратов за счёт совершенствования различных видов их пластической и термомеханической обработки. Одновременно с расширением технологических возможностей сборочного производства обеспечивается более высокое качество и надёжность объектов сборки. В частности, изготовление конструкций из титановых сплавов требует разработки технологических процессов, обеспечивающих значительное упрочнение поверхностных слоёв материала, повышение микротвёрдости и усталостной выносливости поверхностного слоя [1]. При этом улучшаются условия микролегирования поверхности алюминием и другими элементами. Вследствие низкой теплопроводности, высокой химической активности, ограниченных возможностей холодной деформации и пластической деформации при нагреве рассмотрены условия формирования фазового состава, макро- и микроструктуры упрочнённых и легированных слоёв металла. Исследовано влияние насыщения поверхности титанового сплава элементами внедрения как одного из факторов упрочнения, а также дальнейшей поверхностной пластической деформации на характеристики шероховатости и степень деформационного упрочнения поверхностей образцов для испытаний, изготовленных из наиболее широко применяемых видов сортамента титановых сплавов. Возможность расширения номенклатуры изготавливаемых из них деталей, крупногабаритных штамповочных конст-

рукций, освоение прогрессивных технологий точной штамповки заготовок требует также установления влияния деформации ковкой, штамповкой и листовой прокаткой в различных интервалах температур при разных условиях нагрева, видах и режимах процессов ОМД. Исследование свойств одного из наиболее распространённых в АСП сплава VT20 показало, что не во всех случаях применение традиционных процессов пластической деформации при обработке металлов давлением, сварке и термической обработке позволяет изготавливать из него детали и конструкции с высокими показателями прочности, пластичности и усталостной выносливости. Значительное улучшение механических свойств наблюдается у заготовок из сплава VT20 в условиях, когда необходимые показатели прочности и пластичности в листовых штамповках после окончательной объёмной штамповки в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения обеспечиваются после электроконтактного нагрева в области фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения и последующего формообразования при естественном охлаждении в соответствующей технологическим процессам оснастке. Исследования проводились и на штамповочных конструкциях из псевдо- α -титанового сплава VT20 после различных видов листовой и объёмной штамповки и сварки плавлением. Проведённые механические испытания и химический анализ поставляемого сортамента показали, что механические свойства и содержание примесей газов в исследованных в состоянии поставки полуфабрикатах не зависят от их вида и размера, что соответствует требуемым техни-

ческим условиям на поставку. Из общего числа проверенных образцов содержание примесей составляет: 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% [1]. При исследовании микроструктуры в соответствии с требованиями, предъявляемыми к металлографическому анализу титановых сплавов, установлено, что введение при определённых условиях в титановые сплавы водорода приводит к существенным структурным изменениям, в том числе в ряде случаев к измельчению зерна. Исходная структура титановых сплавов, исследованных в работе, была грубой пластинчатой. Легирование водородом вызвало преобразование внутризёрненного строения без измельчения исходного β -зерна. В зависимости от содержания водорода и температуры процесса наводороживания может происходить формирование тонкопластинчатой, глобулярной или смешанной структуры. При этом размеры структурных составляющих могут изменяться в широких пределах, например, толщина α -пластин – от $\sim 0,5$ до ~ 8 мкм. Была установлена температурная зависимость показателей ударной вязкости сплава и пластичности, имеющих различный характер в крупнозернистом и наноструктурном состоянии.

На основе обобщения экспериментальных данных были установлены оптимальные фазовый состав и структура, а также количество β -фазы, при которых наблюдаются наиболее высокие характеристики обрабатываемости резанием различных титановых сплавов, легированных водородом. Получены основные температурные зависимости ударной вязкости, позволяющие определять температуру оптимальных условий вязко-хрупкого перехода и интервал температур обработки материала. Твёрдость сплава в наноструктурном состоянии в среднем на 30% больше, чем в крупнозернистом. Установлено, что в наноструктурном состоянии упрочнение происходит менее интенсивно для процессов листовой вытяжки и объёмной штамповки. Появляется возможность формирования комплекса более высоких механических свойств, в том числе после термомеханической обработки [2].

Оптимизация силовых элементов конструкции летательных аппаратов и систем в настоящее время связана с изучением влияния комплекса факторов на механическую прочность используемых для их изготовления металлов и сплавов. В частности, изучения возможностей снижения степени несовершенства их кристаллической структуры в процессах обработки металлов давлением с учётом реального характера пластического течения металла и построения схемы трёхмерного поля скоростей во всём фактическом очаге деформации. При штамповке сплава VT20 была построена математическая модель процесса и проведён анализ характерных зон, определяемых сходными параметрами локальных тензоров деформаций в зависимости от местоположения анализируемой точки и её окрестности в объёме заготовки. Зависимости могут быть представлены в виде коэффициента парной линейной корреляции m и коэффициента нелинейной корреляции η , на основе которых можно определить, в частности, силу связи между характеристиками обрабатываемости, количеством β -фазы и толщиной α -пластин. Установлено, что оптимальное содержание водорода обеспечивается при определённой температуре наводороживающего отжига. При этом может наблюдаться мелкозернистая структура, тонкопластинчатая структура, мелкоглобулярная структура, мелкая смешанная структура - пластинчатая + глобулярная. Наилучшая обрабатываемость резанием наблюдается при мелкой структуре (тонкопластинчатой, мелкоглобулярной или смешанной).

Установлено несколько причин, которые могли бы объяснить изменение механических свойств титановых сплавов в связи с уменьшением размера структурных составляющих для данного фазового состава или из-за преобразования пластинчатой структуры в глобулярную.

Пластинчатая структура обеспечивает меньшие характеристики пластичности, чем глобулярная структура. Вследствие этого при обработке титановых сплавов пластическая деформация не успевает протекать во всём объёме металла и концентрируется в приконтактном слое, в результате чего там возникают высокие давления и температуры, что обуславливает низкую обрабатываемость резанием титановых сплавов. Режимы обра-

ботки сплавов оказывают, в свою очередь, влияние на наследственные свойства деталей, изготавливаемых из этих материалов. Объёмный наноструктурный титан и его сплавы, полученные интенсивной пластической деформацией, при проведении испытаний показали высокую статическую и циклическую прочность.

Более высокая пластичность при глобулярной структуре должна способствовать повышению обрабатываемости титановых сплавов резанием [2]. 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. Исследованию подвергали поковки одного типоразмера и одной и той же плавки после нескольких переходовковки, штамповки, но с различной температурой окончательной штамповки на последнем переходе. Из поковок вырезали образцы в продольном, поперечном и высотном направлениях для механических испытаний, макро- и микроисследований. Перед испытаниями образцы отжигали для снятия остаточных напряжений после пластической деформации штамповкой.

Оценка механических свойств образцов из сплава ВТ20 в зависимости от условий обработки 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 890 до 1250 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. Установлено, что наиболее высокие характеристики прочности и пластичности – у листовых сварных соединений, наименьшие – у штампованных заготовок 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 α -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 β -фазы. Кроме того, у штамповок, деформированных в области α -фазы, наблюдается стабильность, небольшой разброс и меньшая зависимость механических свойств от направления испытания.

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

Деформация при температуре существования α -фазы, близкой к температуре полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ - превращения, приводит к тому, что явных границ зёрен β -фазы не наблюдается [2]. Полученная структура характеризуется пластинчатым строением внутризеренной α -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 объёме металла, что вызывает повышение пластичности и снижение прочности. Высоким показателям прочности соот-

ветствуют предельно низкие значения пластичности, что не позволяет в полной мере реализовать прочность, которой обладает псевдо- α -сплав.

При нагреве заготовки наблюдается полиморфное $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение.

Электроконтактный нагрев заготовок из сплава ВТ20 до температуры полиморфного превращения и охлаждение в металлическом штампе по сравнению с традиционными методами штамповки приводят к повышению временного сопротивления разрыву (σ_B) на 14%; предела текучести ($\sigma_{0,2}$) на 17%; относительного удлинения (δ) на 40%, угла загиба (α) на 15%; сопротивления малоциклового усталости (МЦУ) на 17%. Существенно снижается и содержание газовых примесей (H_2 , O_2 , N_2).

Таким образом, при использовании электроконтактного нагрева оказалось возможным в полной мере реализовать прочность и пластичность в листовых штамповках, присущую псевдо- α -титановому сплаву ВТ20.

Это обусловлено тем, что тепловое воздействие на металл в интервале температур превращения 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 выраженной металлографической текстуры не происходит (табл.1).

Таблица 1. Размер зёрен α -фазы в сплаве ВТ9 в зависимости от вида нагружения

| Состояние | D , мкм | HRC |
|-----------------------|-----------|-------|
| Исходное состояние | 2,9/3,0 | 55/55 |
| Одноосное растяжение | 3,4/ 3,6 | 48/48 |
| Кручение | 3,7/3,9 | 50/52 |
| Растяжение + кручение | 3,9/4,2 | 49/52 |

В числителе дан размер зёрен d в продольном направлении при фиксированном содержании α -фазы в центре образца, в знаменателе – у края образца. Наблюдаемая однородность зёрен по размеру во всем деформируемом объёме образцов изделий выше, чем в исходном материале заготовок. Средний размер зёрен ($d = 3,9 - 4,1$ мкм) практически одинаков в центре и на периферии образцов. Таким образом, в результате пластической деформации (ковка, штамповка, прокатка) и сварки прочность заготовок из сплава ВТ20 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. Проведение окончательной штамповки заготовок из сплава ВТ20 в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения улучшает механические свойства штамповок, повышает их прочность при незначительном снижении пластичности. Однако прочность и пластичность псевдо- α -титанового сплава ВТ20 в полной мере реализуется в штамповках после соответствующего нагрева в области фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения и последующего охлаждения в металлическом штампе в процессе формообразования.

Результаты испытаний образцов сплава на разрушение и анализ характера разрушения образцов с различной структурой представлены на рис. 1-4. На образцах №1, 2, соответствующих тонкопластинчатой, мелкоглобулярной или смешанной структуре, характер излома является равномерным по всему сечению, структура мелкозернистая, что свидетельствует о высоких прочностных характеристиках материала. Это связано и с тем, что металлографическая текстура практически отсутствует при форме зёрен, близкой к равноосной. На образцах № 3, 4 наблюдается грубое разрушение материала, при этом наблюдаются несплошности материала в виде тёмных участков. Общий характер изломов представляется как хрупкое разрушение сплавов под действием ударной нагрузки. Более детальная картина поверхности разрушения образцов была рассмотрена на электронном микроскопе «Philips-525» при увеличении 300 крат.

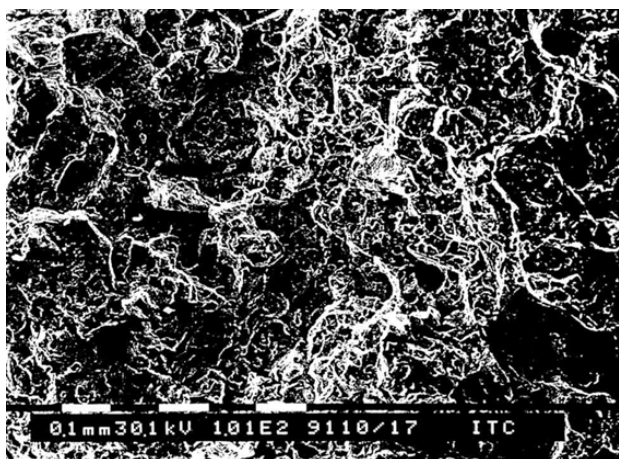


Рис. 1. Разрушение мелкозернистой структуры образца №1

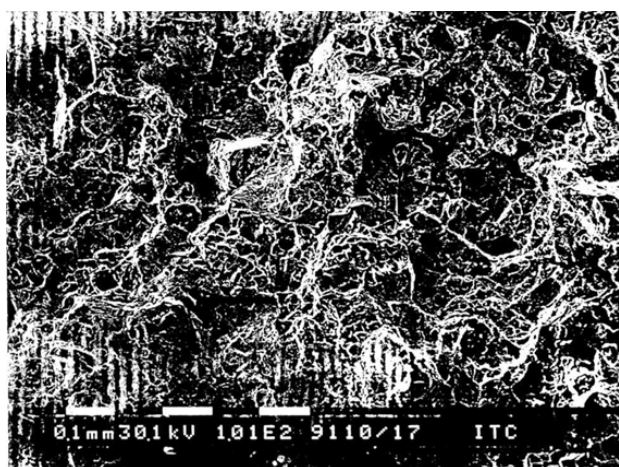


Рис. 2. Разрушение мелкозернистой структуры образца №2

Поверхность излома образцов №1,2 соответствует большей вязкости материала по отношению к образцам №3, 4 (рис. 2), где излом проходит по границам зёрен, и, кроме того, границы являются очагами разрушения материала.

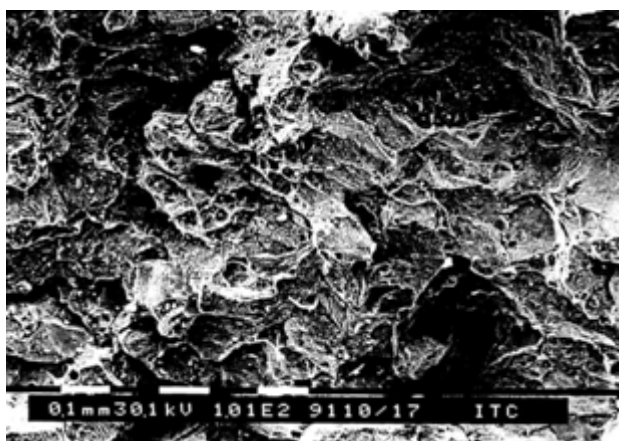


Рис.3. Разрушение крупнозернистой структуры образца №3



Рис.4. Разрушение крупнозернистой структуры образца №4

Таким образом, можно сделать вывод о незначительном влиянии температуры обработки на механические свойства сплава. Наличие в образце № 3 структурной неоднородности и дефектов в виде несплошностей материала по границам зёрен может привести к разрушению деталей при их эксплуатации. Анализ полученных результатов показывает, что точность получаемых решений зависит от правильности выбора математической модели технологических процессов обработки сплавов. Математическое моделирование процессов разрушения позволяет также обеспечивать гарантированные свойства металла в зависимости от условий эксплуатации, то есть обеспечивать такую структуру, при которой разрушения металла не наступит при допустимых величинах упруго-пластической деформации. Более мелкозернистой структуре соответствует и меньший размер элементов структуры разрушения, показывающий на качественном уровне закономерности изменения пластичности металла в области вязкого разрушения. Показатели, характеризующие протяжённость области хрупкого разрушения, определяются из условия:

$$\frac{\delta}{\tau_s} > \left(\frac{\delta}{\tau_s} \right)_n,$$

устанавливающего область существования пластичности, где δ - среднее нормальное остаточное напряжение, τ_s - сопротивление деформации при чистом сдвиге.

Заключение. Характер формирующейся дислокационной структуры, плотность распределения микропор и микротрещин,

микротрещин внутренней структуры зависят от условий техпроцесса получения заготовок, вида режимов процессов обработки металлов давлением. Это позволяет научно обосновать способы получения деталей для повышения ресурса деталей из титановых сплавов, учитывать основные факторы, определяющие надёжность и качество летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Водородная технология титановых

сплавов [Текст] / Б.А. Колачев, А.А. Ильин, В.К. Носов [и др.]. - М.: МИСиС, 2002. - 392с.

2. Средний размер зёрен в титановом сплаве ВТ6 и выбор рациональной схемы интегрального процесса сверхпластической формовки сварки давлением [Текст] / С.П. Малышева, Г.А. Салищев, Р.М. Галеев [и др.] // Перспективные материалы. - 2005. - №6. - С.79 – 85.

RESEARCH OF FEATURES OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMATION OF PROPERTIES OF ASSEMBLY UNITS OF AIRCRAFT

© 2012 F. V. Grechnikov, S. F. Tlustenko

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

The results of formation of structure assortment of commercially pure titanium as a function of the coarse-grained or nanostructured status for providing the mechanical properties obtained a variety of ways details of assemblies are presented. The structure of titanium, depending on the circumstances and the nature of hydrogen absorption during machining is investigated. The impact of particular modes of heating and deformation processing workpieces on texture formation and the fluctuations of the mechanical properties of metal on its area and thickness are established.

Deformation, structure, durability, plasticity, viscosity, workability, formation.

Информация об авторах

Гречников Фёдор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: исследование процессов обработки металлов давлением.

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: titan250@mail.ru. Область научных интересов: исследование зависимости механических свойств конструкционных материалов от способов их получения, проектирование технологических процессов сборки в авиастроении.

Grechnikov Fedor Vasilyevich, the Member correspondent of the Russian Academy of Sciences; Doctor of Technical Sciences, Professor, the Manager chair OMD, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: study of processes of production aircraft, quality management in engineering.

Tlustenko Stanislav Fedotovich, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: titan250@mail.ru. Area of research: study on mechanical properties of structural materials by means of obtaining them, design of technological processes of assemblies in the aircraft industry.