

УДК 669.295+629.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗАДАНЫМ УСЛОВИЯМ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2014 С.Ф. Глустенко

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 насыщения водородом 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. Показаны результаты исследований связи изменений кристаллографической текстуры образцов из титана с характером формирования микроструктуры сплава в технологических процессах горячей пластической деформации на примере цилиндрических образцов из двухфазного титанового сплава ВТ9 при различных схемах приложения нагрузок и деформации в виде одноосного растяжения, кручения и кручения с одновременным растяжением.

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

Изготовление конструкций из титановых сплавов требует разработки технологических процессов, обеспечивающих значительное упрочнение поверхностных слоёв материала с одновременным повышением микротвёрдости поверхностного слоя. При этом создаются условия для 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 поверхностной пластической деформации на характеристики шероховатости и степень деформационного упрочнения поверхностей образцов для испытаний, изготовленных из наиболее широко применяемых видов сортамента титановых сплавов. Изготовление из них деталей, штампованных конструкций, освоение прогрессивных технологий точной штамповки заготовок требует также оценки влияния деформации ковкой, штамповкой и листовой прокаткой в раз-

личных интервалах температур при разных условиях нагрева. Для наиболее распространённого сплава ВТ20 установлено, что не во всех случаях традиционные методы пластической деформации, сварки и термической обработки изготовленных из него деталей и конструкций позволяют получать в них высокие показатели прочности, пластичности и усталостной выносливости. Значительное улучшение механических свойств наблюдается у заготовок из сплава ВТ20 после окончательной объёмной штамповки в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ - превращения. При изготовлении отдельных деталей необходимые показатели прочности и пластичности в листовых штамповках из титанового сплава ВТ20 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 штампованных конструкциях из псевдо- α -титанового сплава ВТ20 после различных видов листовой и объёмной штамповки и сварки плавлением. Проведённые механические испытания и химический анализ поставляемого сортамента показали, что механические свойства и содержа-

ние примесей газов в исследованных в состоянии поставки полуфабрикатах не зависят от их вида и размера и соответствуют требуемым техническим условиям на поставку. Из общего числа проверенных плавок 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%. Исследования микроструктуры проведены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к металлографическому анализу титановых сплавов. Установлено, что введение при определенных условиях в титановые сплавы водорода приводит к существенным структурным изменениям, в том числе в ряде случаев к измельчению зерна. Исходная структура исследованных титановых сплавов была грубой пластинчатой. Легирование водородом вызвало преобразование внутризёрненного строения без измельчения исходного β -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 α -пластин – от $\sim 0,5$ до ~ 8 мкм. Было отмечено, что при этом появляется 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. Зависимости могут быть пред-

ставлены в виде коэффициента парной линейной корреляции m и коэффициента нелинейной корреляции η , на основе которых можно определить, в частности, силу связи между характеристиками обрабатываемости резанием, количеством β -фазы и толщиной α -пластин.

Оптимальное содержание водорода обеспечивается при температуре наводороживающего отжига 820°C . 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 всем объёме металла и концентрируется в приконтактном слое, в результате чего там возникают высокие давления и температуры, что обуславливает низкую обрабатываемость резанием титановых сплавов. Режимы обработки 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. В соответствии с теорией вязкости разрушения уменьшение размера зерна обрабатываемого материала сопровождается умень-

шением 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 поволоков вырезали образцы в продольном, поперечном и высотном направлениях для механических испытаний, макро- и микроисследований. Перед испытаниями образцы отжигали при 830°С в течение 1,5 ч 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 поволоков. Повышение прочностных характеристик полужабрикатов 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, наименьшее – у штампосварных заготовок после электронно-лучевой сварки.

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. Причём 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. Полученная структура характеризуется пластинчатым строением внутризёрненной 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 соответствуют предельно низ-

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

При нагреве заготовки до температуры 970°C наблюдается полиморфное $\alpha \rightarrow \beta$ - «предпревращение».

Электроконтактный нагрев заготовок из сплава VT20 до температуры полиморфного предпревращения 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 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 VT20.

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 [1] при горячей пластической деформации цилиндрических образцов из двухфазного титанового сплава VT9 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 VT9 в зависимости от вида нагружения

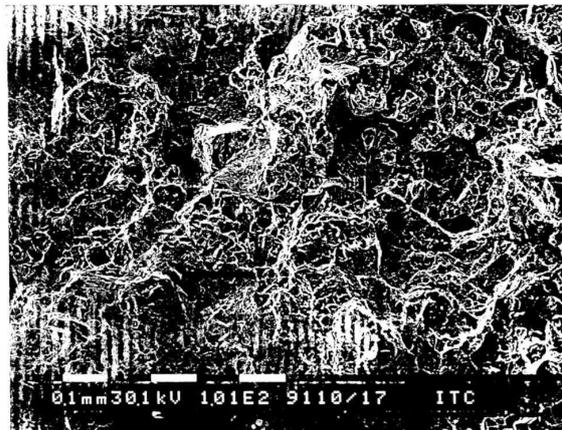
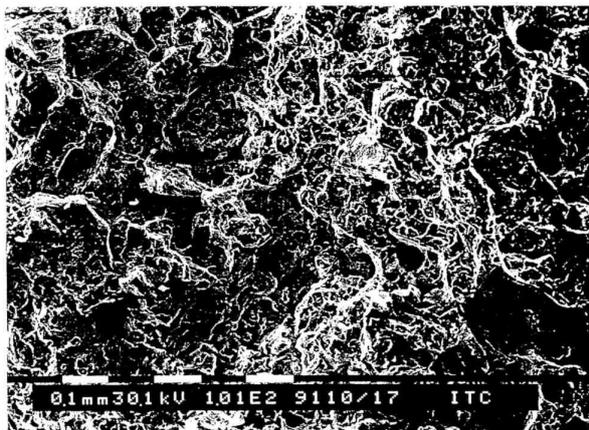
Состояние	D , mm	HRC
Исходное состояние	2,9/3,0	55/55
Одноосное растяжение	3,4/ 3,6	48/48
Кручение	3,7/3,9	50/52
Растяжение + кручение	3,9/4,2	49/52

В числителе дан размер зёрен d в продольном направлении при фиксированном содержании α -фазы в центре образца, в знаменателе – у края образца. Температура деформации $t_{\text{деф}} = 970^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Наблюдаемая однородность зёрен по размеру во всём 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 VT20 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 VT20 в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ предпревращения улучшает механические свойства штамповок, повышает их прочность при незначительном снижении пластичности. Однако прочность и пластичность псевдо α -титанового сплава VT20 в полной мере реализуется в штамповках после соответствующего нагрева в области фазового $\alpha \rightarrow \beta$ предпревращения и последующего охлаждения в металлическом штампе в процессе формообразования.

Был рассмотрен характер разрушения образцов с различной структурой (рис.1,2). На образцах №1 и №2 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

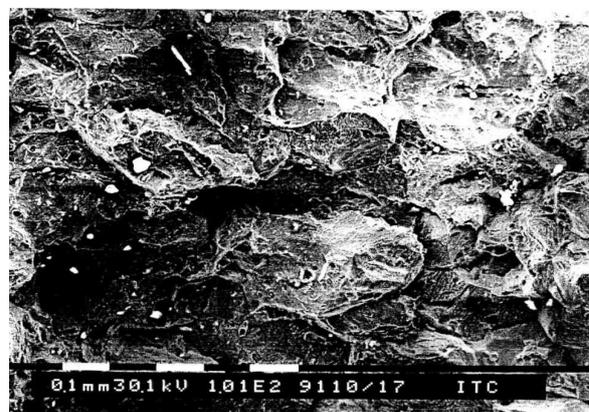
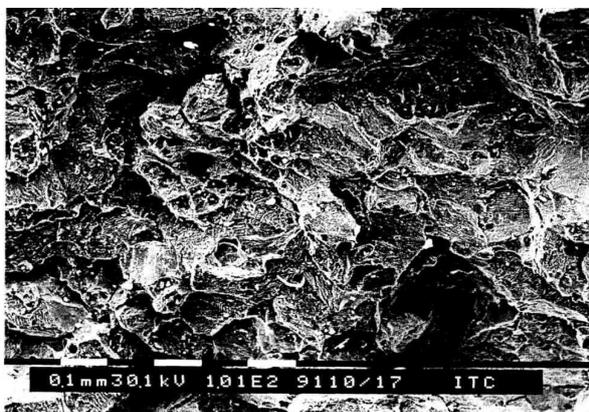
микроскопе «Philips-525» при увеличении 300 крат.



а

б

Рис.1. Разрушение мелкозернистой структуры



а

б

Рис.2. Разрушение крупнозернистой структуры

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

рантированные свойства металла в зависимости от условий эксплуатации, то есть обеспечивать такую структуру, при которой разрушение 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, устанавливающего область существования пластичности:

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

где δ - среднее нормальное остаточное напряжение, τ_s - сопротивление деформа-

ции при чистом сдвиге. Характер формирующейся дислокационной структуры, плотность распределения микропор и микротрещин, микродефектов внутренней структуры также зависит от условий тех-

процесса получения заготовок. Это позволяет научно обосновать ресурс деталей из титановых сплавов по основным факторам, определяющим процесс задержанного разрушения.

Библиографический список

1. Колачев Б.А., Ильин А.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Водородная технология титановых сплавов. М.: МИСиС, 2002. 392 с.

Информация об авторе

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: titan250@mail.ru. Об-

ласть научных интересов: исследование зависимости механических свойств конструкционных материалов от способов их получения, проектирование технологических процессов сборки в авиастроении.

TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PRODUCING MATERIALS BY SPECIFIED CRITERIA OF FORMING THE PROPERTIES OF AIRCRAFT ASSEMBLY UNITS

©2014 S.F. Tlustenko

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Results of formation of structure of an assortment from the technical cleanliness titan depending on coarse-grained or nanostructural state for maintenance of mechanical properties received by various ways of details of assemblages are presented. The structure of the titan depending on conditions and character saturation by hydrogen is studied at machining. It is established that modes on character of technological deformation of preparations render proskating rinks of strips and sheets hereditary influence on fluctuations of mechanical properties of metal on its area and a thickness. It is shown the results of studies link changes in crystallographic texture samples of titanium with the nature of the formation of the microstructure of the alloy in the technological processes of hot plastic deformation on the example of cylindrical samples of two-phase titanium alloy VT9 under various schemes application of stress and strain in machining, tension, torsion, ching.

Deformation, structure, durability, plasticity, viscosity, machining, application of stress, fluctuations.

References

1. Koulachev B.A., Il'in A.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Vodorodnaya tekhnologiya titanovykh splavov [Hydrogen technology of titan alloys]. Moscow: MISiS Publ., 2002. 392 p.

About the author

Tlustenko Stanislav Fedotovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Samara State Aerospace 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.