

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЁВ И ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ПРОЧНОСТИ

А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский

В настоящее время при производстве тонколистовых титановых конструкций предъявляются повышенные требования к качеству поверхности, а именно, регламентированное удаление газонасыщенных слоев и оксидных пленок травлением. По мнению большинства авторов, образование оксидных пленок и газонасыщенных слоев приводит к снижению прочностных и усталостных характеристик основного металла. Однако в литературных данных имеются сведения и о положительном влиянии частично сохранных газонасыщенных слоев на механические свойства, что позволяет снизить безвозвратные потери металла.

В статье детально изучено влияние твердости предварительно сформированных газонасыщенных слоёв и температуры финишного отжига на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности - ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч. С этой целью формировали регламентированные газонасыщенные слои, подвергая образцы высокотемпературному отжигу, пескоструйной обработке и химическому травлению. Испытания образцов на ударную вязкость (КСУ) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 с применением специальных приспособлений.

Показано, что применение оптимальных температур отжига может значительно повысить ударную вязкость сплавов технического титана ВТ1-0 и сплава пониженной прочности ПТ7М. При этом существенное значение имеет протяжённость и микротвёрдость газонасыщенного подслоя

Ключевые слова: поверхностное газонасыщение, отжиг, ударная вязкость

Известно, что при нагреве титановых сплавов при температурах выше 300 °С на поверхности формируются интерференционно окрашенные оксидные плёнки, а при температурах выше 550 °С начинается заметное растворение кислорода в титан, что может приводить к охрупчиванию и снижению эксплуатационной долговечности в условиях динамического нагружения [1]. Преобладает мнение [2-3], что окисленные слои, формирующиеся при нагреве в печах с воздушной атмосферой при температурах не выше 600-650 °С не приводят к заметному ухудшению механических свойств основного металла. Более того, в некоторых работах [4] приводятся данные о том, что при неполном травлении газонасыщенных слоёв достигается эффект некоторого повышения циклической долговечности, что можно было бы использовать при производстве листовых титановых полуфабрикатов с целью снижения безвозвратных потерь титана при травлении.

Одной из важнейших механических характеристик металла является ударная вязкость, которая весьма чувствительна к повышению поверхностной твердости металла при образовании газонасыщенных слоёв. В то же время в литературе практически отсутствуют данные о влиянии поверхностного окисления на ударную вязкость титановых сплавов.

Целью данной работы является исследование влияния газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности.

В качестве материалов для исследований использовали листовые титановые сплавы различных групп прочности, нашедшие широкое применение при изготовлении элементов конструкций летательных аппаратов: технический титан ВТ1-0, сплав пониженной прочности ПТ7М и высокопрочный сплав ВТ6ч.

Изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость КСУ из листов толщиной 1,2 мм, которые изображены на рис. 1. После изготовления образцы подвергали предварительному высокотемпературному воздушному отжигу по режимам 800 °С, 2 ч. (технический титан ВТ1-0) и 850 °С, 1 ч. (сплавы ПТ7М и ВТ6ч) в лабораторной печи с целью формирования достаточно протяженных газонасыщенных слоев рис. 2.

Далее удаляли поверхностную окалину пескоструйной обработкой при избыточном давлении 0,1 МПа и проводили облагораживающее травление в смеси кислот HF и HNO<sub>3</sub> на различную глубину вплоть до полного снятия слоя. В заключение выполняли одночасовой воздушный финишный отжиг в интервале температур 350-650 °С.

Испытания образцов на ударную вязкость (КСУ) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м. Для исключения потери устойчивости и изгиба листовых образцов в процессе испытания применяли специальное приспособление.

На рис. 3-5 представлены результаты испытаний образцов, на ударную вязкость построенные в зависимости  $КСУ=f(T)$  при различной глубине травления  $I_{тр}$ .

---

Коломенский Александр Борисович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор; ВАСО, главный металлург, e-mail: metallurg@air.vrn.ru

Шахов Сергей Викторович – ВАСО, ведущий инженер-конструктор, e-mail: shahovsv@gmail.com

Коломенский Борис Александрович – ВАСО, канд. техн. наук, помощник директора по качеству, e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

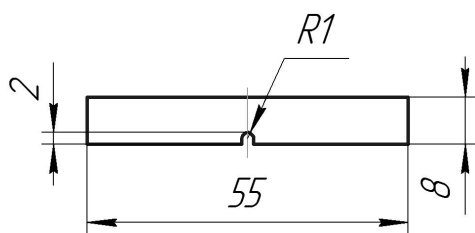
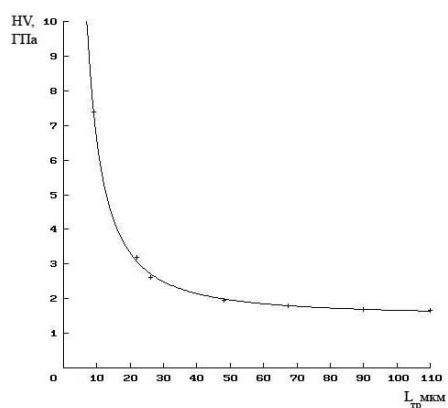
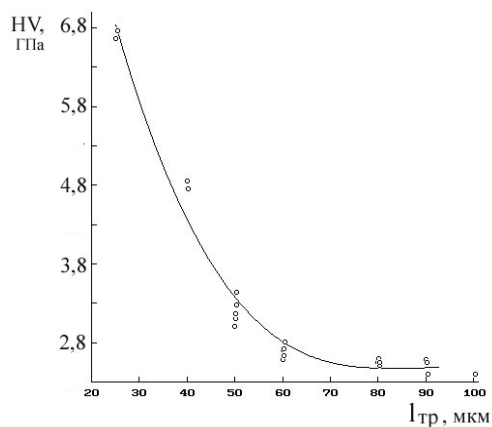


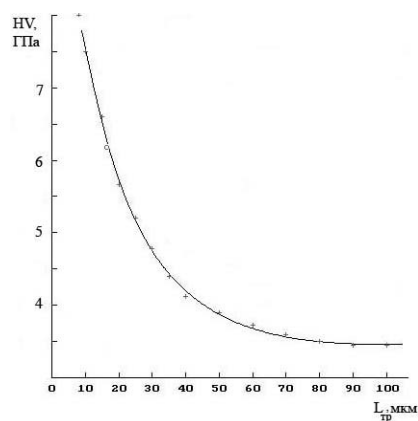
Рис. 1. Образцы для испытаний на ударную вязкость



а

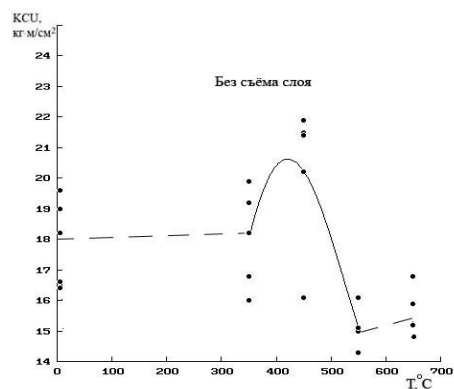


б

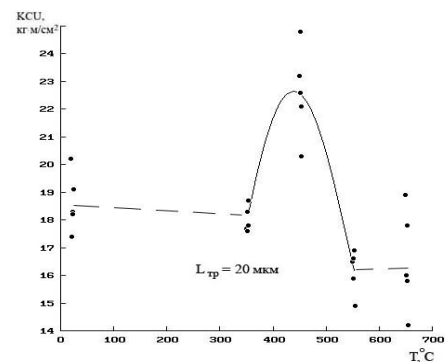


в

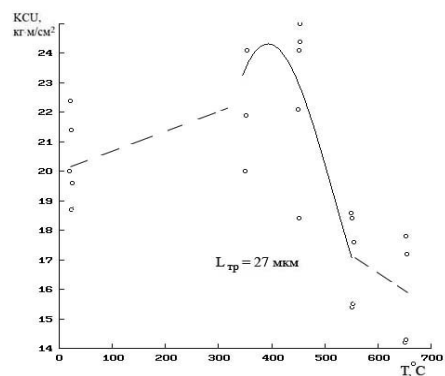
Рис. 2. Зависимость микротвёрдости поверхности образцов после предварительного высокотемпературного отжига от глубины травления: а – для технического титана сплава ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч



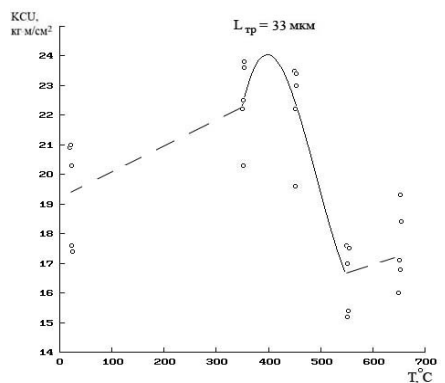
а



б



в



г

Рис. 3. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости  $KCU=f(T)$  при различной глубине травления для сплава ВТ1-0: а – с окалиной; б – после пескоструйки; в – 27 мкм; г – 33 мкм; д – 48 мкм; е – 65 мкм; ж – 100 мкм

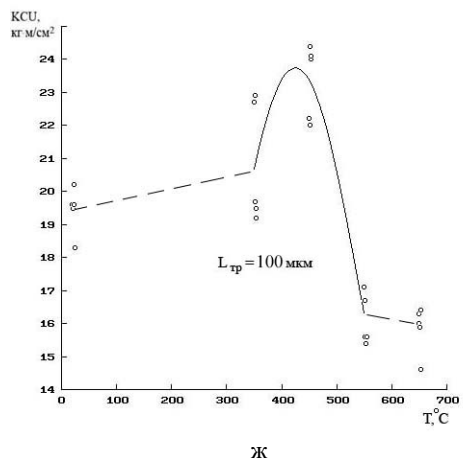
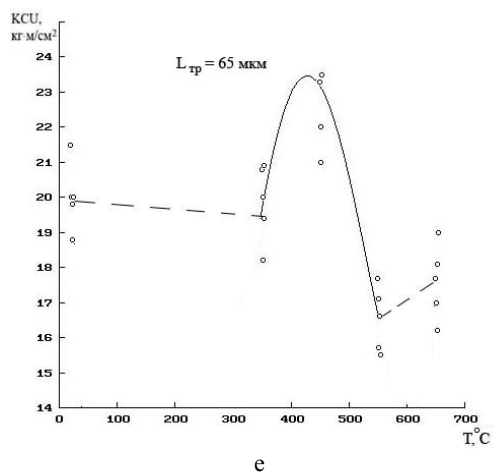
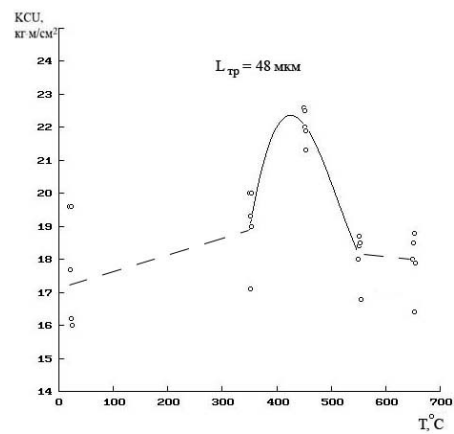


Рис. 3. Продолжение

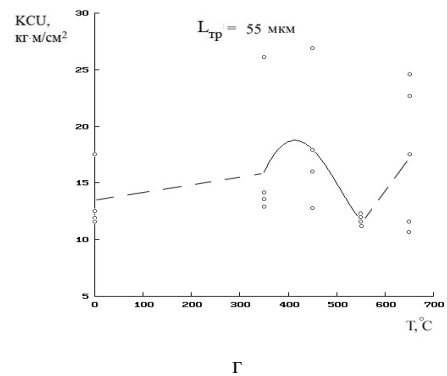
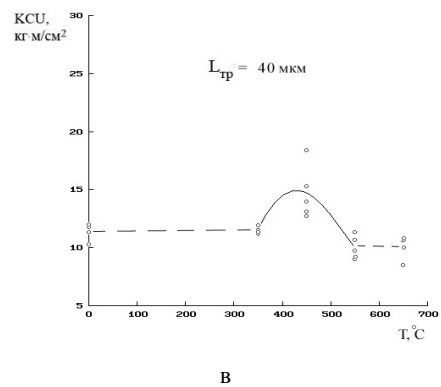
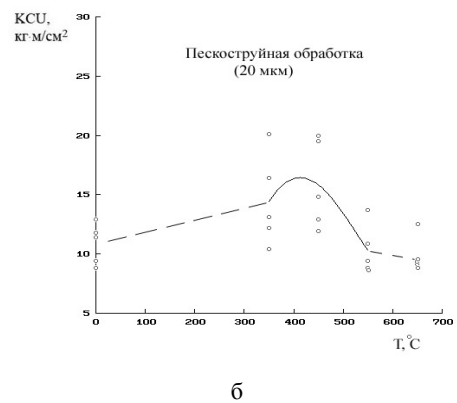
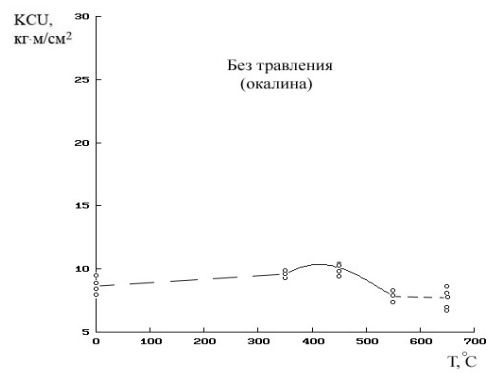


Рис. 4. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости  $KCU=f(T)$  при различной глубине травления для сплава ПТ7М: а – с окалиной; б – после пескоструйки; в – 40 мкм; г – 55 мкм; д – 60 мкм; е – 75 мкм; ж – 100 мкм

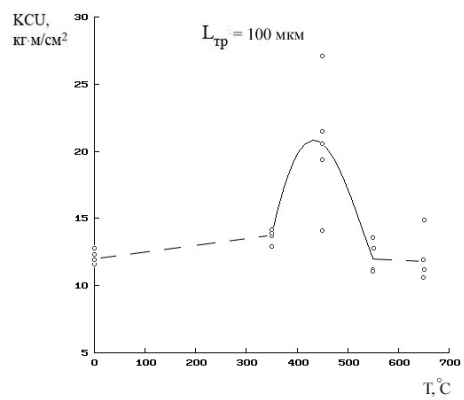
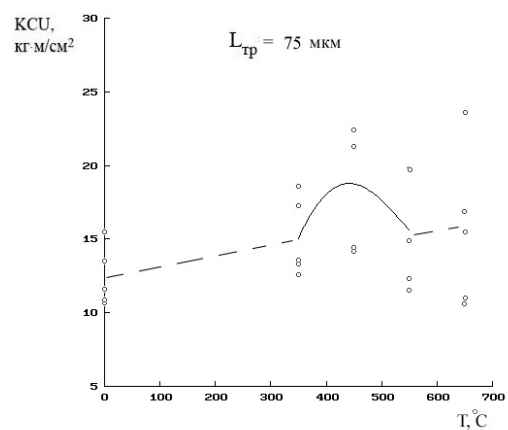
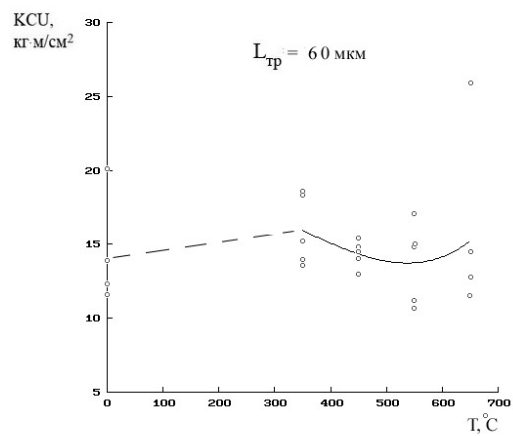


Рис. 4. Продолжение

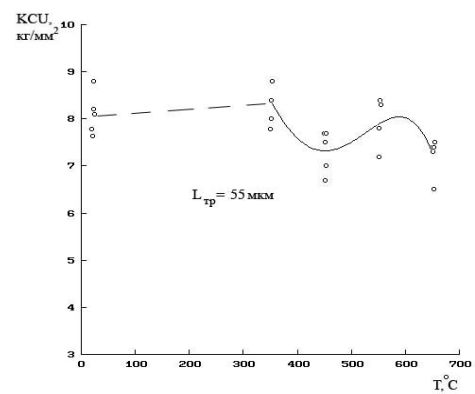
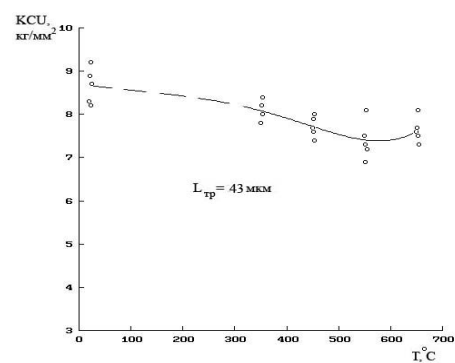
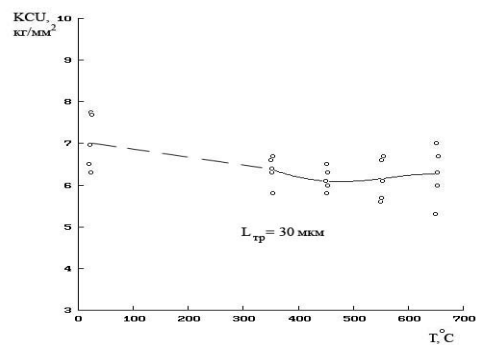
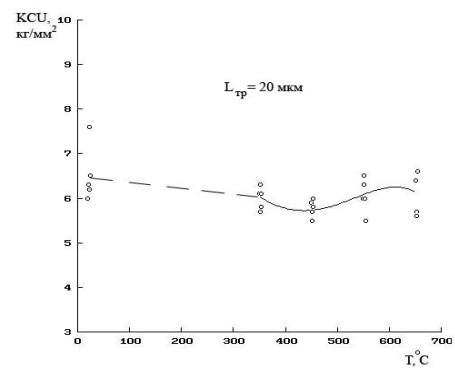


Рис. 5. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости  $KCU=f(T)$  при различной глубине травления для сплава Вгбч: а – после пескоструйки; б – 30 мкм; в – 43 мкм; г – 55 мкм; д – 70 мкм; е – 80 мкм; ж – 100 мкм

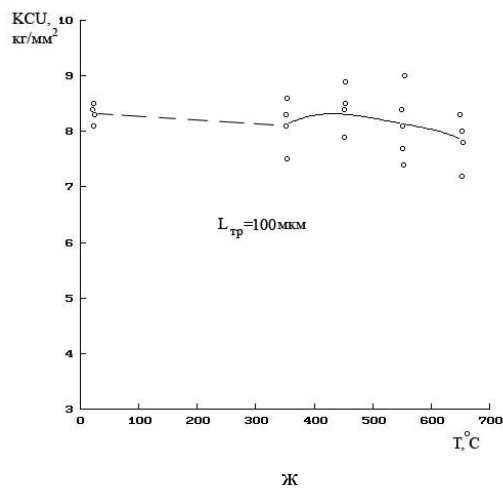
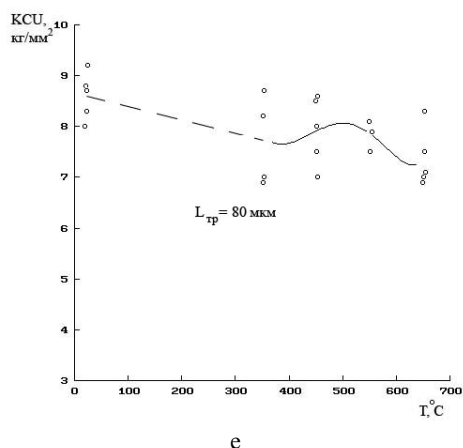
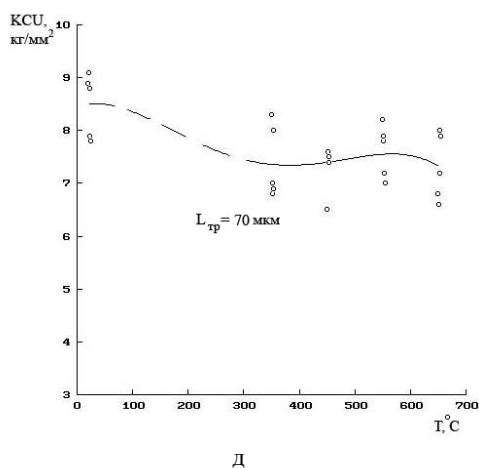


Рис. 5. Продолжение

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали коэффициент  $K_c = KCU/KCU_{бс}$ , показывающий, какое влияние оказывают разные газонасыщенные подслои при выбранной температуре отжига  $T_{отж}$ , а также  $K_T = KCU/KCU_{б0}$ , показывающий, какое воздействие оказывает  $T_{отж}$  (оксидная плёнка, формирующаяся при данной  $T_{отж}$ ) при выбранном подслое.

$KCU_{бс}$  – ударная вязкость металла с полностью стравленным газонасыщенным слоем ( $\Delta HV=0$ ) при рассматриваемой  $T_{отж}$ , а  $KCU_{б0}$  – ударная вязкость металла с рассматриваемым газонасыщенным слоем

без финишного отжига. Полученные результаты коэффициентов  $K_c$ ,  $K_T$  для различных сплавов представлены в табл. 1-6.

Таблица 1

Значение  $K_c$  для технического титана BT1-0

| $\Delta HV, \%$<br>( $l_{тр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                       | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 280 %<br>(10 мкм)                            | 0,93                      | 0,89 | 0,91 | 0,89 | 1,0  |
| 112 %<br>(20 мкм)                            | 0,97                      | 0,92 | 1,0  | 0,94 | 1,07 |
| 78 %<br>(27 мкм)                             | 1,08                      | 1,04 | 0,98 | 1,0  | 1,10 |
| 48 %<br>(33 мкм)                             | 1,05                      | 1,13 | 0,98 | 1,0  | 1,11 |
| 19 %<br>(48 мкм)                             | 0,97                      | 0,96 | 0,98 | 1,09 | 1,13 |
| 8 %<br>(65 мкм)                              | 1,0                       | 0,98 | 0,98 | 1,0  | 1,13 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                       | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

Таблица 2

Значение  $K_T$  для технического титана BT1-0

| $\Delta HV, \%$<br>( $l_{тр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                       | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 280 %<br>(10 мкм)                            | 1,0                       | 1,01 | 1,15 | 0,85 | 0,89 |
| 112 %<br>(20 мкм)                            | 1,0                       | 1,0  | 1,22 | 0,87 | 0,92 |
| 78 %<br>(25 мкм)                             | 1,0                       | 1,01 | 1,07 | 0,82 | 0,84 |
| 48 %<br>(33 мкм)                             | 1,0                       | 1,13 | 1,10 | 0,85 | 0,88 |
| 19 %<br>(48 мкм)                             | 1,0                       | 1,04 | 1,19 | 1,0  | 0,97 |
| 8 %<br>(65 мкм)                              | 1,0                       | 1,03 | 1,16 | 0,89 | 0,94 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                       | 1,05 | 1,18 | 0,89 | 0,83 |

Таблица 3

Значение  $K_c$  для сплава ПТ7М

| $\Delta HV, \%$<br>( $l_{тр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                       | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 214 %<br>(22 мкм)                            | 0,84                      | 0,91 | 0,69 | 0,82 | 0,80 |
| 74 %<br>(40 мкм)                             | 0,93                      | 0,84 | 0,73 | 0,80 | 0,86 |
| 22 %<br>(54 мкм)                             | 1,07                      | 1    | 0,79 | 0,93 | 1,46 |
| 12 %<br>(60 мкм)                             | 1,11                      | 1,23 | 0,73 | 1,09 | 1,33 |
| 6 %<br>(76 мкм)                              | 1,02                      | 1,09 | 0,91 | 1,15 | 1,36 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                       | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

Таблица 4  
Значение  $K_T$  для сплава ПТ7м

| $\Delta HV$ , %<br>( $I_{пр.}$ ,<br>мкм) | $T_{отж.}$ , °C |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                          | б/о             | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 214 %<br>(22 мкм)                        | 1,0             | 1,20 | 1,37 | 1,0  | 0,90 |
| 74 %<br>(40 мкм)                         | 1,0             | 1,0  | 1,31 | 0,88 | 0,88 |
| 22 %<br>(54 мкм)                         | 1,0             | 1,04 | 1,22 | 0,89 | 1,30 |
| 12 %<br>(60 мкм)                         | 1,0             | 1,28 | 1,10 | 1,0  | 1,14 |
| 6 %<br>(76 мкм)                          | 1,0             | 1,19 | 1,49 | 1,15 | 1,27 |
| 0 %<br>(100 мкм)                         | 1,0             | 1,11 | 1,66 | 1,02 | 0,95 |

Таблица 5  
Значение  $K_c$  для сплава ВТ6ч

| $\Delta HV$ , %<br>( $I_{пр.}$ ,<br>мкм) | $T_{отж.}$ , °C |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                          | б/о             | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 68 %<br>(20 мкм)                         | 0,78            | 0,75 | 0,69 | 0,77 | 0,82 |
| 40 %<br>(30 мкм)                         | 0,84            | 0,78 | 0,74 | 0,78 | 0,82 |
| 16 %<br>(43 мкм)                         | 1,05            | 1,0  | 0,93 | 0,92 | 0,98 |
| 9 %<br>(55 мкм)                          | 0,97            | 1,02 | 0,87 | 0,97 | 0,94 |
| 5 %<br>(70 мкм)                          | 1,02            | 0,90 | 0,89 | 0,95 | 0,95 |
| 3 %<br>(80 мкм)                          | 1,04            | 0,95 | 0,95 | 0,97 | 0,95 |
| 0 %<br>(100 мкм)                         | 1,0             | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

Таблица 6  
Значение  $K_T$  для сплава ВТ6ч

| $\Delta HV$ , %<br>( $I_{пр.}$ ,<br>мкм) | $T_{отж.}$ , °C |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                          | б/о             | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 68 %<br>(20 мкм)                         | 1,0             | 0,94 | 0,88 | 0,95 | 0,96 |
| 40 %<br>(30 мкм)                         | 1,0             | 0,90 | 0,88 | 0,89 | 0,89 |
| 16 %<br>(43 мкм)                         | 1,0             | 0,95 | 0,88 | 0,84 | 0,86 |
| 9 %<br>(55 мкм)                          | 1,0             | 1,05 | 0,90 | 1,0  | 0,97 |
| 5 %<br>(70 мкм)                          | 1,0             | 0,88 | 0,87 | 0,93 | 0,93 |
| 3 %<br>(80 мкм)                          | 1,0             | 0,91 | 0,91 | 0,93 | 0,91 |

Для титановых сплавов низкой и средней прочности ВТ1-0 и ПТ7м обнаружена устойчивая закономерность, проявляющаяся в достижении максимума KCU при температуре финишного отжига 450 °C.

Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах газонасыщенных подслоев.

Для технического титана ВТ1-0 коэффициент повышения KCU ( $K_T = KCU/KCU_{60}$ ) при  $T_{отж.} = 450$  °C в сравнении с вариантом без отжига составляет  $K_T = 1,15-1,20$  для всех газонасыщенных подслоев.

Для сплава ПТ7м коэффициент повышения имеет наибольшие значения для чистого металла без газонасыщенного подслоя ( $K_T = 1,66$ ) и с небольшим подслоем с  $\Delta HV = 6$  % ( $K_T = 1,49$ ); при больших значениях ( $\Delta HV = 12-214$  %) данный коэффициент уменьшается до  $K_T = 1,10-1,37$ .

Выявленный максимум при  $T_{отж.} = 450$  °C по-видимому связан с формированием оптимальной оксидной плёнки, оказывающей выраженное упрочняющее действие и повышающее работу по зарождению и распространению трещины при испытаниях.

Повышение  $T_{отж.}$  до 550-650 °C, сопровождающееся дальнейшим ростом оксидной плёнки и одновременным началом растворения кислорода в титане приводит к снижению ударной вязкости титана ВТ1-0 на 10-15 % ( $K_T = 0,85-0,90$ ), а для сплава ПТ7м – возвращению KCU к исходным значениям (без отжига). Указанная тенденция снижения KCU выявляется практически для всех значений  $\Delta HV$  газонасыщенного подслоя.

При этом, как правило, для  $T_{отж.} = 550$  °C значения KCU оказывались ниже, чем при  $T_{отж.} = 650$  °C, что можно связать с развитием процесса растворения кислорода в титан.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч выявлена тенденция небольшого (до 10-15%) снижения KCU после проведения финишного отжига во всём. исследованном диапазоне температур 350-650 °C и для всех вариантов газонасыщенных подслоев, причём минимум во всех случаях приходится на  $T_{отж.} = 450$  °C.

Это можно объяснить негативным воздействием оксидных плёнок, обладающих упрочняющим воздействием, для высокопрочного металла с ограниченной пластичностью.

Следует отметить, что для чистого металла без газонасыщенного подслоя не отмечается снижения KCU после отжига при  $T_{отж.} = 450$  °C.

Исследовали вариант с полностью охрупченной зоной концентратора, когда при изготовлении образца в зоне (отверстия) концентратора после высокотемпературного предварительного отжига при  $T_{пр.отж.} = 800-850$  °C сохранялись (не стравливалась) изначальные окалина и газонасыщенный слой. Остальные поверхности образца обрабатывали так же, как и для основной партии, то есть газонасыщенный слой стравливали послойно и проводили финишный отжиг. Таким образом, последующая обработка (послойное травление, финишный отжиг) уже практически не меняла степень охрупченности зоны концентратора, а влияла только на приповерхностные слои зоны распространения трещины.

При анализе результатов обработки экспериментальных данных установлено (табл. 7-8), что оксидные плёнки, формирующиеся в процессе финишного отжига титана ВТ1-0, для всех

газонасыщенных подслоев повышают КСУ: для подслоев с  $\Delta HV \leq 19\%$  коэффициент  $K_T \leq 1,10$ , а для подслоев с  $\Delta HV = 38-45\%$  значения коэффициента несколько возрастают до  $K_T = 1,17-1,25$ . При этом по мере повышения  $\Delta HV$  максимум КСУ смещается с  $T_{отж.} = 450^\circ\text{C}$  на  $T_{отж.} = 500^\circ\text{C}$ .

Для высокопрочного сплава (табл. 9-10) ВТ6ч с охрупченной зоной концентратора эффект повышения КСУ после финишного отжига проявляется намного сильнее, чем для титана ВТ1-0: для подслоев с  $\Delta HV \leq 28\%$  и без подслоя ( $\Delta HV = 0$ ) коэффициент повышения  $K_T = 1,6-1,8$ , при этом во всех случаях максимум соответствует  $T_{отж.} = 350^\circ\text{C}$ , а по мере роста  $T_{отж.}$  эффект повышения несколько ослабевает (до  $K_T = 1,4-1,45$ ).

Таблица 7  
Значения  $K_c$  для технического титана ВТ1-0 (охрупченный концентратор)

| $\Delta HV, \%$<br>( $I_{пр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж.}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                        | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 400 %<br>(7,5 мкм)                           | 0,75                       | 0,69 | 0,70 | 0,85 | 0,89 |
| 45 %<br>(33 мкм)                             | 0,98                       | 1,06 | 1,03 | 1,13 | 1,08 |
| 38 %<br>(37 мкм)                             | 0,97                       | 0,94 | 1,0  | 1,05 | 1,02 |
| 19 %<br>(47 мкм)                             | 1,04                       | 0,95 | 0,98 | 1,04 | 1,01 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                        | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

Таблица 8  
Значения  $K_T$  для технического титана ВТ1-0 (охрупченный концентратор)

| $\Delta HV, \%$<br>( $I_{пр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж.}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                        | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 400 %<br>(7,5 мкм)                           | 1,0                        | 1,0  | 1,03 | 1,23 | 1,20 |
| 45 %<br>(33 мкм)                             | 1,0                        | 1,17 | 1,15 | 1,24 | 1,11 |
| 38 %<br>(37 мкм)                             | 1,0                        | 1,05 | 1,13 | 1,16 | 1,06 |
| 19 %<br>(47 мкм)                             | 1,0                        | 1,0  | 1,04 | 1,08 | 0,98 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                        | 1,09 | 1,10 | 1,08 | 1,01 |

Таблица 9  
Значения  $K_c$  для сплава ВТ6ч (охрупченный концентратор)

| $\Delta HV, \%$<br>( $I_{пр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж.}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                        | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 68 %<br>(20 мкм)                             | 1,16                       | 0,9  | 0,98 | 1,0  | 1,02 |
| 28 %<br>(35 мкм)                             | 0,95                       | 1,0  | 0,98 | 1,0  | 1,0  |
| 16 %<br>(43 мкм)                             | 1,03                       | 1,18 | 1,13 | 1,02 | 1,18 |
| 9 %<br>(55 мкм)                              | 1,16                       | 1,31 | 1,31 | 1,30 | 1,40 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                        | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

Таблица 10  
Значения  $K_T$  для сплава ВТ6ч (охрупченный концентратор)

| $\Delta HV, \%$<br>( $I_{пр.}, \text{мкм}$ ) | $T_{отж.}, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |
|----------------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
|                                              | б/о                        | 350  | 450  | 550  | 650  |
| 68 %<br>(20 мкм)                             | 1,0                        | 1,22 | 1,28 | 1,28 | 1,22 |
| 28 %<br>(35 мкм)                             | 1,0                        | 1,65 | 1,56 | 1,56 | 1,45 |
| 16 %<br>(43 мкм)                             | 1,0                        | 1,81 | 1,66 | 1,48 | 1,58 |
| 9 %<br>(55 мкм)                              | 1,0                        | 1,77 | 1,71 | 1,67 | 1,67 |
| 0 %<br>(100 мкм)                             | 1,0                        | 1,57 | 1,51 | 1,49 | 1,38 |

Выявлено, что для варианта с охрупченным концентратором для всех изученных  $T_{отж.}$  максимум значений КСУ приходится на подслои с  $\Delta HV = 9\%$ .

Таким образом, установлено, что при охрупченном концентраторе для высокопрочного титанового сплава ВТ6ч небольшой газонасыщенный подслои ( $\Delta HV = 9-18\%$ ) в сочетании с оксидной плёнкой, формирующейся при низкотемпературном финишном отжиге ( $T_{отж.} = 350^\circ\text{C}$ ) может заметно увеличить работу по распространению трещины при испытании на КСУ.

### Выводы

1. При испытаниях на ударную вязкость для титановых сплавов низкой и средней прочности ВТ1-0 и ПТ7м обнаружена устойчивая закономерность, проявляющаяся в достижении максимума при температуре финишного отжига  $450^\circ\text{C}$ , что, по-видимому связано с формированием оптимальной оксидной плёнки, оказывающей выражающее упрочняющее действие и повышающее работу по зарождению и распространению трещины. Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах газонасыщенных подслоев.

2. Для титана ВТ1-0 повышение ударной вязкости при оптимальной температуре отжига в сравнении с вариантом без отжига составляет  $\sim 15-20\%$  для всех исследованных газонасыщенных подслоев.

Для сплава ПТ7м наибольший рост ударной вязкости (на  $\sim 50-65\%$ ) достигается для металла без газонасыщенного подслоя и для металла с небольшим перепадом микротвёрдости ( $\Delta HV = 6\%$ ); при больших значениях перепадов ( $\Delta HV = 12-214\%$ ) прирост ударной вязкости снижается ( $10-37\%$ ).

3. При охрупченном концентраторе, когда работа по зарождению трещины минимальна, оксидные плёнки на поверхностях образцов, формирующиеся в процессе финишного отжига, могут заметно увеличить работу по распространению трещины при испытании на КСУ.

Для титана ВТ1-0 при подслое с небольшим перепадом микротвёрдости ( $\Delta HV \leq 19\%$ ) повышение КСУ в пределах  $10\%$ , а для подслоев с  $\Delta HV = 38-45\%$

% рост КСУ составляет 17-25 %. При этом по мере повышения  $\Delta HV$  максимум КСУ смещается с  $T_{отж.}=450\text{ }^{\circ}\text{C}$  на  $T_{отж.}=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для высокопрочного сплава ВТ6ч эффект увеличения КСУ проявляется значительно сильнее. Для подслоев с  $\Delta HV \leq 28\%$  повышение КСУ при оптимальной  $T_{отж.}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет 60-80 %, а по мере роста перепадов микротвёрдости и  $T_{отж.}$  полезный эффект несколько ослабевает.

4. Полученные закономерности можно использовать для оптимизации технологических параметров в процессе получения титановых полуфабрикатов, а также при назначении режимов финишного отжига деталей из листовых титановых сплавов.

#### Литература

1. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев,

В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.

2. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов, Ю.В. Васькин. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.

3. Глазунов, С.Г. Конструкционные титановые сплавы/ С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.

4. Влияние регламентированного съема травлением поверхностного газонасыщенного слоя на долговечность при малоциклового усталости листов из титана ВТ1-0 / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // Технология легких сплавов. – 1990. – №6. – С. 20–24.

5. Вавилова, В.В. Влияние кислорода на свойства титана и его сплавов / В.В. Вавилова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1973. – №10. – С. 10–14.

Воронежский государственный технический университет  
Воронежское акционерное самолетостроительное общество

## INFLUENCE OF GAS-SATURATED LAYERS AND OXIDE FILMS ON THE IMPACT TOUGHNESS OF TITANIUM ALLOYS OF DIFFERENT STRENGTH

**A.B. Kolomensky<sup>1</sup>, S.V. Shakhov<sup>2</sup>, B.A. Kolomensky<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Professor, Voronezh State Technical University; Chief Metallurgist, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation

e-mail: metallurg@air.vrn.ru

<sup>2</sup>Leading engineer, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation

e-mail: shahovsv@gmail.com

<sup>3</sup>Assistant quality director, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation,

e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

Nowadays, when producing sheet titanium constructions, it is greatly demanded to make the surface of high quality, notably to remove gas-saturated layers and oxide films by etching. In the opinion of the majority of authors, the formation of oxide films and gas-saturated layers leads to the reduction of strength and fatigue characteristics of the base metal. However, according to literary sources, there are some data about positive effect of partly saved gas-saturated layers on the mechanical properties, which allows to reduce the irretrievable metal loss.

The article studies in details the influence of the hardness of preformed gas-saturated layers and finishing annealing temperature on the impact toughness of titanium alloys of different strength - VT1-0, PT7M and VT6ch. For this purpose regulated gas-saturated layers were formed, exposed to high-temperature annealing, sandblasting and chemical etching. Impact toughness (KCU) tests were taken in accordance with regulations of State Standard 9454-78 with the use of special equipment.

It is shown that the impact toughness of technical titanium VT1-0 and low-strength alloy PT7m can increase significantly under the optimal annealing temperatures. The length and microhardness of gas-saturated sublayer also influence the result

Key words: surface gas-saturation, annealing, impact toughness

#### References

1. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I., "Metal science and heat treatment of nonferrous metals and alloys" ("Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov"), Metallurgy (Metallurgia) (1981): 416

2. Moiseev, V.N., Kulikov F.R., Kirilov. U.G., Vaskin U.V., "Welded joints of titanium alloys" ("Svarnye soedinenia titanovykh spлавov"), Metallurgy (Metallurgia) (1979): 248

3. Glazunov S.G., Moiseev V.N., "Structural titanium alloys" ("Konstruktsionnye titanovye splavy"), Metallurgy (Metallurgia) (1974): 368

4. Kolomensky A.B., Kolachev B.A., Degtyarev A.V., Roshchupkin A.N., "Influence of regulated removal made by etching of surface gas-saturated layer on the durability under the condition of low-cycle fatigue of titanium sheet" ("Vliyanie reglamentirovannogo s'ema travleniem poverkhnostnogo gazonasyschennogo sloya na dolgovechnost' pri malotsiklovey ustalosti listov iz titana BT1-0"), Light alloys technology 6 (1990): 20–24.

5. Vavilova V.V., "Influence of oxygen on the properties of titanium and its alloys" ("Vliyanie kisloroda na svoystva titana i ego spлавov"), Metal science and heat treatment of metals 10 (1973): 10–14.