



The influence of impact elasticity and specific work of crack resistance on fastness of plates with thickness 100 mm of alloy BT23 is studied.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВА ВТ23 В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЗАГОТОВОК ПЛИТЫ

Изучали зависимость ударной вязкости (КСУ) и удельной работы вязкости разрушения (КСТ) от прочности (σ_b) плит толщиной 100 мм из сплава ВТ23 (рис. 1), которые термообработывали по режимам, указанным в работе [1]. Характерным является то, что при повышении σ_b вплоть до значений 1270 МПа ($\delta > 5\%$) удельная работа зарождения трещины при ударной нагрузке, вычисленная по формуле [2]:

$$a_3 = \text{КСУ} - \text{КСТ},$$

остаётся примерно без изменения – около 0,25 МДж/м², а удельная работа разрушения (КСТ) уменьшается значительно: с 0,5 до 0,1 МДж/м². Причем при $\sigma_b = 1020\text{--}1100$ МПа на зарождение трещины требуется удельная работа $a_3 = 0,25$ МДж/м² меньшая, чем для дальнейшего разрушения образца с трещиной $\text{КСТ} = 0,25\text{--}0,55$ МДж/м². При упрочнении образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23 выше 1270 МПа наблюдается одновременное уменьшение a_3 с 0,25 до 0,12 МДж/м² ($\sigma_b \approx 1430$ МПа) и КСТ с 0,10 до 0,03 МДж/м² ($\sigma_b \approx 1430$ МПа). На основе такого поведения материала можно предположить, что для данного типа структуры сплава ВТ23 рост прочности выше 1270–1280 МПа при одновременном снижении пластичности ($\delta < 5\%$) увеличивает вероятность появления усталостных трещин от ударных воздействий на высоконагруженных деталях, изготовленных из плит толщиной 100 мм, особенно в местах концентрации напряжений и приводит к преждевременному разрушению деталей.

Для подтверждения высказанного предположения были проведены дополнительные исследования изломов разрушенных ударом образцов с трещиной с целью определения характера разрушения при различных значениях прочности плиты из сплава ВТ23. По

методике, изложенной в работе [3], определяли зависимость КСТ– ϵ (ϵ – величина боковых сколов). Полученные результаты приведены на рис. 2. Более выраженную прямолинейную зависимость КСТ– ϵ наблюдали при значении КСТ меньше 0,1 МДж/м² при уровне механических свойств: $\sigma_b > 1270$ МПа, $\delta < 5\%$, КСУ $< 0,3$ МДж/м². Для сталей ярко выраженная прямолинейная зависимость КСТ– ϵ характеризует полухрупкое разрушение [3] при ударном нагружении.

В данном случае фрактографические исследования разрушенных ударом образцов с надрезом из плиты сплава ВТ23 показали, что разрушение во всех случаях происходило по механизму образования и слияния микропустот [4, 5]. Об этом свидетельствует ямочная поверхность разрушения (рис. 3), что присуще вязкому разрушению. Следует однако отметить значительные отличия в тра-

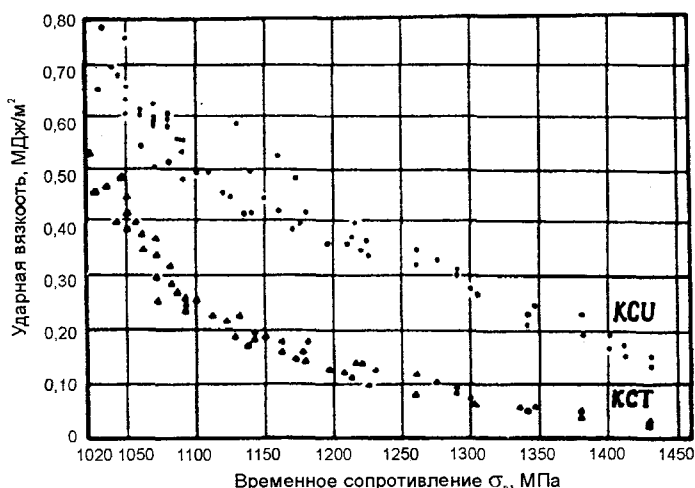


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости (КСУ) и удельной работы вязкости разрушения образцов с трещиной при ударном изгибе (КСТ) от кратковременной прочности σ_b термически упрочненных образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23

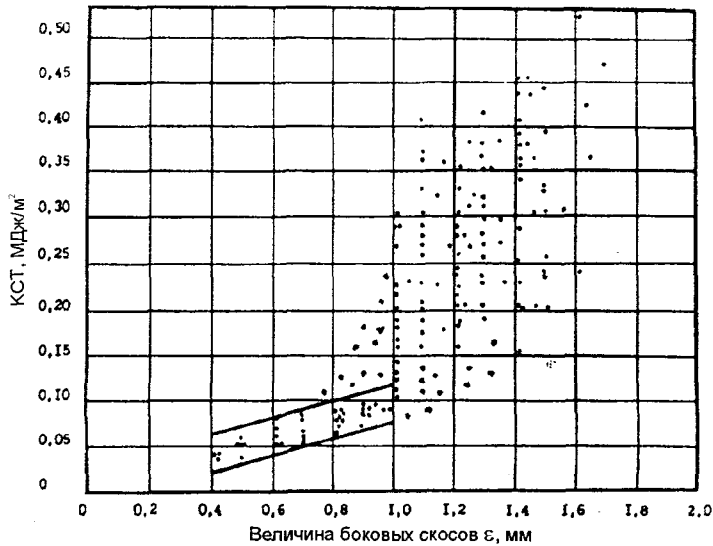


Рис. 2. Соотношение значений работы вязкости разрушения образцов с усталостной трещиной (КСТ) и величины боковых сколов ϵ , образующихся на боковых сторонах образцов при испытании ударной вязкости

екториях распространения трещин у образцов, имеющих КСТ больше и меньше $0,1 \text{ МДж/м}^2$. При значениях КСТ больше $0,1 \text{ МДж/м}^2$ на поверхности изломов образцов наблюдаются отдельные фасетки (рис. 3, а, б), свидетельствующие о заметном отклонении разрушающей трещины от направления приложенного разрушающего напряжения, а при КСТ меньше $0,1 \text{ МДж/м}^2$ траектория трещины на образцах наиболее близка к прямолинейной, профиль излома ровный (рис. 3, в). На поверхности изломов образцов с $\text{KCT} > 0,1 \text{ МДж/м}^2$ к тому же имеются вторичные трещины (рис. 3, г), которые показывают, что магистральная трещина не только отклонялась при своем распространении от магистрального направления, но и разветвлялась. Это в свою очередь приводит к дополнительным энергетическим затратам при распространении трещины [5]. На поверхностях разрушения образцов с $\text{KCT} < 0,1 \text{ МДж/м}^2$ такие вторичные трещины наблюдали очень редко, а при значениях $\text{KCT} < 0,05 \text{ МДж/м}^2$ они не были обнаружены (рис. 3, д), что свидетельствует о повышении чувствительности к трещине образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23 с пластинчатой структурой при увеличении прочности выше 1280 МПа и значениях $\delta < 5\%$ в случае приложения ударных нагрузок.

Исследовали поведение продольных образцов плиты из сплава ВТ23 с пластинчатой структурой (гладкие образцы диаметром 10 мм, $\sigma_{\text{max}} = 900 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{min}} = 150 \text{ МПа}$, $\nu = 5 \text{ Гц}$ и образцы диаметром 10 мм с острым кольцевым надрезом: $r = 0,1 \text{ мм}$, $k_f = 4$; σ_{max} соответственно 400, 500 и 600 МПа, $\sigma_{\text{min}} = 150 \text{ МПа}$, $\nu = 3 \text{ Гц}$), термически упрочненных на уровень $\sigma_b = 1000\text{--}1450 \text{ МПа}$, в условиях малоциклового усталости. Общепринято [6, 7], что разрушение металлов при повторностатических нагрузениях (а, значит, и долговечность конструк-

ционного элемента) неразрывно связано со стадиями зарождения (образование микротрещины и ее распространение) и роста усталостной трещины. Зарождение усталостных трещин в металлических материалах происходит, как правило, в поверхностном слое образца и обусловлено рядом факторов: шероховатостью поверхности, окружающей средой, аномальными свойствами поверхностного слоя. При испытании в данном случае гладких образцов два первых фактора были примерно одинаковы для всех испытываемых образцов, действие третьего фактора усиливалось по мере повышения прочности сплава ВТ23. Поскольку образцы получали точением, то с повышением прочности сплава ВТ23 (это характерно для всех случаев механической обработки термически упрочненных титановых сплавов) наклеп поверхностного слоя усиливался, что способствовало повышению сопротивления материала к зарождению усталостной трещины (при нагрузке $\sigma_{\text{max}} = 900 \text{ МПа}$ стадия зарождения трещины является определяющей [8]), что хорошо видно из рис. 4 (кривая 2): при прочности материала $\sigma_b = 1100 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 10000$ циклов, при $\sigma_b = 1280 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 18000$ циклов, при $\sigma_b = 1430 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 23000$ циклов, т.е. при испытании малоциклового усталости гладких образцов, полученных точением из заготовок предварительно термически упрочненного сплава ВТ23, повышение прочности материала способствует однозначно увеличению числа циклов до разрушения. Кроме наклепанного слоя, на зарождение усталостной трещины в гладких образцах влияет также наличие в структуре сплава ВТ23 концентраторов напряжений, то есть структурный фактор [9, 10]. В случае двухфазных титановых сплавов таковыми, по-видимому, являются пластины первичной α -фазы [11], выходящие на поверхность образца. Чем толще и протяженнее пластины первичной α -фазы (это прослеживается в сплаве ВТ23 у образцов плит, закалку которых проводили с более низких температур нагрева и имеющих соответственно по сравнению с образцами, закаленными с более высоких температур, более низкую прочность), тем больше склонен сплав к зарождению трещины.

Образцы плиты термоупрочненного сплава ВТ23 с острым надрезом при испытании на малоциклового усталость при значениях $\sigma_{\text{max}} = 400 \text{ МПа}$ (рис. 4, кривая 1) имеют примерно ту же зависимость среднего (N_{cp}) числа циклов до разрушения от прочности сплава, что и у гладких образцов при значениях $\sigma_{\text{max}} = 900 \text{ МПа}$ (рис. 4, кривая 2). Отличие составляют только более высокие значения N_{cp} : при прочности сплава ВТ23 $\sigma_b = 1030 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 16000$ циклов, при $\sigma_b = 1080 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 18000$ циклов, при $\sigma_b = 1280 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 22500$ циклов, при $\sigma_b = 1430 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 26500$ циклов.

Образцы плиты термоупрочненного сплава ВТ23 с острым надрезом при испытании на малоциклового усталость при значениях $\sigma_{\text{max}} = 400 \text{ МПа}$ (рис. 4, кривая 1) имеют примерно ту же зависимость среднего (N_{cp}) числа циклов до разрушения от прочности сплава, что и у гладких образцов при значениях $\sigma_{\text{max}} = 900 \text{ МПа}$ (рис. 4, кривая 2). Отличие составляют только более высокие значения N_{cp} : при прочности сплава ВТ23 $\sigma_b = 1030 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 16000$ циклов, при $\sigma_b = 1080 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 18000$ циклов, при $\sigma_b = 1280 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 22500$ циклов, при $\sigma_b = 1430 \text{ МПа}$ $N_{\text{cp}} = 26500$ циклов.

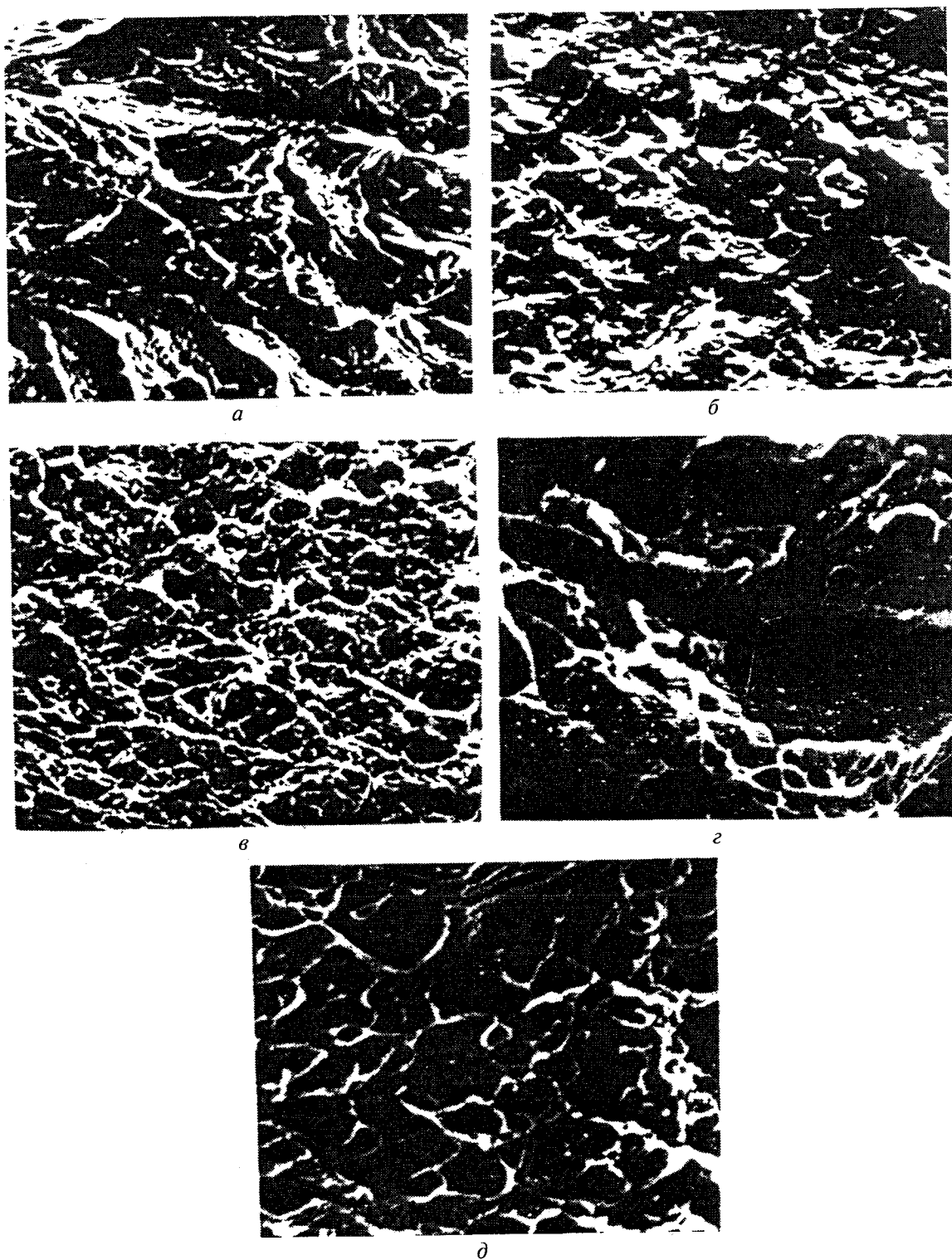


Рис. 3. Микрофрактограммы разрушенных образцов с трещиной при ударном изгибе для термически упрочненных заготовок плиты толщиной 100 мм из сплава VT23: *a* – КСТ=0,45 МДж/м²; *б* – 0,10; *в* – 0,05; *г* – >0,10; *д* – <0,10 МДж/м².
a, б, в – $\times 300$; *г, д* – $\times 1000$

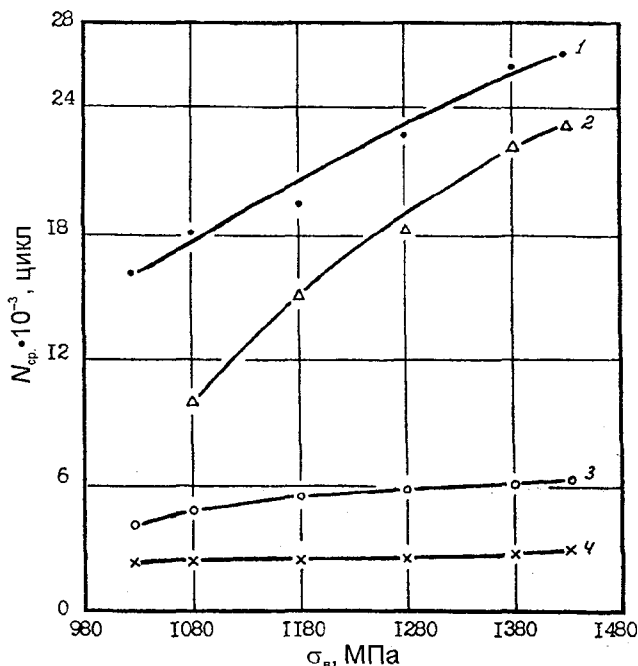


Рис. 4. Изменение среднего числа циклов до разрушения при испытании на малоцикловую усталость ($\nu=3$ Гц) термически упрочненных образцов плиты толщиной 100 мм из сплава ВТ23 в зависимости от их прочности (σ_b): 1, 3, 4 — образцы с острым кольцевым надрезом $r=0,1$ мм, диаметром 10 мм ($k_f=4,0$) при максимальном нагружении соответственно 400, 500 и 600 МПа и минимальном 100 МПа; 2 — гладкие образцы диаметром 10 мм при максимальном нагружении 900 МПа

При значениях напряжений $\sigma_{max}=400$ МПа зарождение усталостной трещины у образцов с острым надрезом термоупрочненного сплава ВТ23 также, по-видимому, следует связывать с размерами, ориентировкой и геометрической формой частиц первичной α -фазы [11, 12], а также с состоянием межфазных границ. Следует также отметить для данного случая, что при достижении сплавом ВТ23 прочности $\sigma_b > 1180$ МПа разброс значений (дисперсия ΔN) числа циклов до разрушения несколько возрастает по сравнению с менее упрочненными сплавами ВТ23, по всей видимости, это уже следует связывать со стадией роста усталостной трещины.

При повышении нагрузки σ_{max} до 500 и 600 МПа (кривые 3 и 4) значения среднего числа циклов до разрушения значительно снижаются, а зависимость N_{cp} от прочности образцов сплава ВТ23 при испытании малоциклового усталости становится совсем незначительной: в первом случае при $\sigma_b=1030$ МПа $N_{cp}=3800$ циклов, при $\sigma_b=1180$ МПа $N_{cp}=5200$ циклов, при $\sigma_b=1430$ МПа $N_{cp}=6100$ циклов, а во втором случае при $\sigma_b=$

$=1030$ МПа $N_{cp}=2400$ циклов, при $\sigma_b=1180$ МПа $N_{cp}=2700$ циклов, при $\sigma_b=1430$ МПа $N_{cp}=2900$ циклов. По всей видимости, при повышении σ_{max} до 600 МПа роль стадии зарождения трещины в общем процессе усталостного разрушения резко снижается независимо от прочности сплава ВТ23, так как появление любой микротрещины в данном случае заканчивается ускоренным ростом ее до длины, превышающей размер структурного элемента: α -пластины и β -зерна [11], а в дальнейшем и усталостным разрушением.

Выявленные закономерности зависимостей КСУ (КСТ) — σ_b и малоцикловая усталость — σ_b для термически упрочненного сплава ВТ23 с пластинчатой структурой дают возможность проведения оценки конструктивных свойств при наличии неоднородности упрочнения в реальных изделиях, а также позволяют определить верхний допустимый предел упрочнения сплава исходя из требований надежности конструкции при эксплуатации [13].

Литература

- Хорев А.И., Федулов В.И., Мартынова М.М. О взаимосвязи прочности и удельной работы разрушения термически упрочненного сплава ВТ23 применительно к крупногабаритным плитам // Технология легких сплавов. 1988. Вып. 6. С. 28–32.
- Колачев Б.А. Физическое металловедение титана. М.: Металлургия, 1976.
- Шахназаров Ю.В. Оценка качества стали по излому. Л.: ЛДНТП, 1982. С. 3–10.
- Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Новосильцева Н.Н. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983.
- Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983.
- Зэн С., Шапер М., Зэлигер П. Описание поведения малых усталостных трещин // ФХММ. 1989. № 5. С. 18–22.
- Ярема С.Я. Об основах и некоторых проблемах механики усталостного разрушения // ФХММ. 1987. № 5. С. 17–29.
- Доможиров Л.И., Махутов Н.А. Влияние свойств поверхностного слоя металлов на развитие малых усталостных трещин // ФХММ. 1989. № 5. С. 13–18.
- Алексейчук И.Б., Карзов Г.П., Никонов Ю.А. Механизм роста усталостной трещины во вторично-твердеющей стали // ФХММ. 1984. № 3. С. 65–69.
- Федотов А.С. Закономерности разрушения двухфазных сплавов с различной микроструктурой // МиТОМ. 1984. № 5.
- Ботвина Л.Р., Коган И.С., Лимарь Л.В. Рост малых усталостных трещин в образцах с надрезами // ФХММ. 1984. № 3. С. 77–80.
- Колачев Б.А., Гринберг В.А. Исследование характеристик работоспособности плит из сплава ВТ6 // Технология легких сплавов. 1984. № 3.
- Федулов В.Н. Влияние технологии термической обработки на свойства плит сплава ВТ23 при упрочнении до $\sigma_b > 1200$ МПа // Авиационная промышленность. 1991. № 8. С. 43–45.