

А. С. КАЗАРИН, Д. Я. КАГАН

ВЛИЯНИЕ ТЕРМО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ СПЛАВА ЭИ-437Б

Расчеты на прочность деталей, работающих в условиях ползучести, требуют знания не только прочностных, но и деформационных характеристик материала при высоких температурах. Если в настоящее время механические и жаропрочные свойства сплава ЭИ437Б со стандартной термообработкой (Н) изучены достаточно подробно, то некоторые вопросы поведения сплава ЭИ437Б, получившего термо-механическую обработку ТМО, еще недостаточно изучены, хотя положительное влияние ТМО на механические и жаропрочные свойства при повышенных температурах известно. Это, в первую очередь, относится к изучению процесса ползучести сплава с ТМО при температурах, находящихся как ниже, так и выше порога разупрочнения для сплава ЭИ437Б, что и явилось основной целью данного исследования.

Положительное влияние ТМО на механические и жаропрочные свойства при повышенных температурах связывается с образованием блочности в структуре, с повышением свойств самих кристаллов, с появлением остаточных напряжений 2-го и 3-го рода и изменением механизма старения (упрочняющая дисперсная фаза выделяется более полно и более равномерно).

Эффект упрочнения объясняет и теория дислокаций. Однако известно, что эффект упрочнения сохраняется до определенных температур.

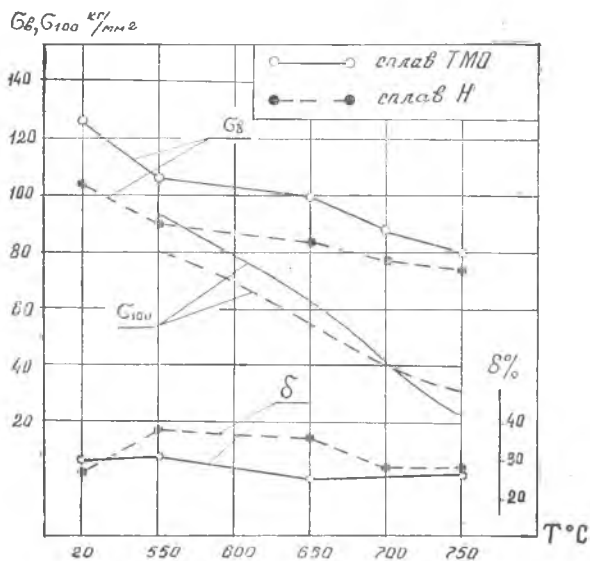
С повышением температуры увеличивается диффузионная подвижность атомов, значительно нарушается термодинамическая устойчивость и начинается процесс разупрочнения. Естественно, процесс разупрочнения более активно протекает у материала, предварительно наклепанного, т. е., находящегося в более неравновесном состоянии.

В настоящей работе исследовался сплав ЭИ437Б, подвергавшийся термо-механической и стандартной термообработке.

ТМО заключалась в следующем:

- нагрев до $T=1120^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 45 мин.;
- горячая деформация (обжатие) на 20%;
- старение при $T=700^{\circ}\text{C}$, выдержка 16 ч, охлаждение на воздухе.

На фиг. 1 представлены зависимости механических характери-



Фиг. 1.

стик и пределов длительной прочности от температуры испытания. Из рассмотрения фиг. 1 следует, что предел прочности после ТМО повышается при $T=20^{\circ}\text{C}$ на 25%, а в диапазоне температур $T=550^{\circ}\text{C}—750^{\circ}\text{C}$ σ_b также выше на 18÷8% по сравнению со сплавом, имеющим стандартную термообработку, т. е. с увеличением температуры эффект ТМО уменьшается.

Следует также отметить, что ТМО приводит к повышению длительной прочности до $T=700^{\circ}\text{C}$. При $T=700^{\circ}\text{C}$ наблюдается равнопрочность, а при температурах выше 700°C длительная прочность понижается, т. е. порог разупрочнения по длительной прочности находится примерно при $T=700^{\circ}\text{C}$.

Кроме того установлено, что положительной особенностью ТМО является сохранение материалом высокой пластичности, отсутствие чувствительности к надрезам и уменьшение склонности к тепловому охрупчиванию.

Методика исследования ползучести предусматривала сопоставительное изучение деформационного поведения сплава ЭИ437Б, имеющего как стандартную, так и термо-механическую обработку с получением характеристик ползучести при температурах как ниже, так и выше порога разупрочнения ($T=550^{\circ}$ и 750°C).

Специальной программой испытаний при $T=550^{\circ}$ (догрузка до более высокого напряжения) предусматривалось изучение влияния пластической деформации, полученной в результате предварительной ползучести при более низком напряжении на скорость ползучести (оценка предварительной тренировки материала).

На фиг. 2 представлены кривые и скорости ползучести при $T=550^{\circ}\text{C}$ и $\sigma_{нач} = 55 \text{ кг/мм}^2$.

Из рассмотрения фиг. 2 следует, что поведение образцов ТМО и Н неодинаковое. Если на I этапе сопротивление ползучести

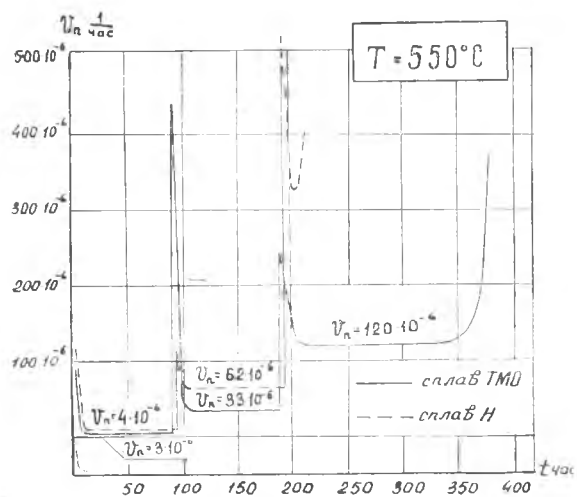
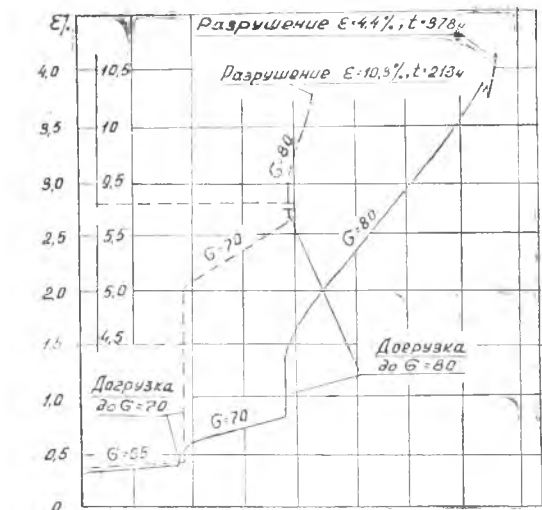
одинаковое, т. е. скорости установившейся ползучести соответственно равны $v_{ТМО} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}$ и $v_{Н} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}$, то на II и III этапах опыта преимущество следует отдать образцу ТМО. К этому следует добавить, что разрушение образцов Н наступает при меньших величинах пластической деформации, приобретенной за счет ползучести.

Эти значения соответственно равны: для образца Н — $\varepsilon_{пл} = 1,2\%$; для образца ТМО — $\varepsilon_{пл} = 3,3\%$, что свидетельствует о меньшей склонности образца ТМО к тепловому охрупчиванию по сравнению с образцом Н.

Данное положение подтверждается опытами всех остальных серий.

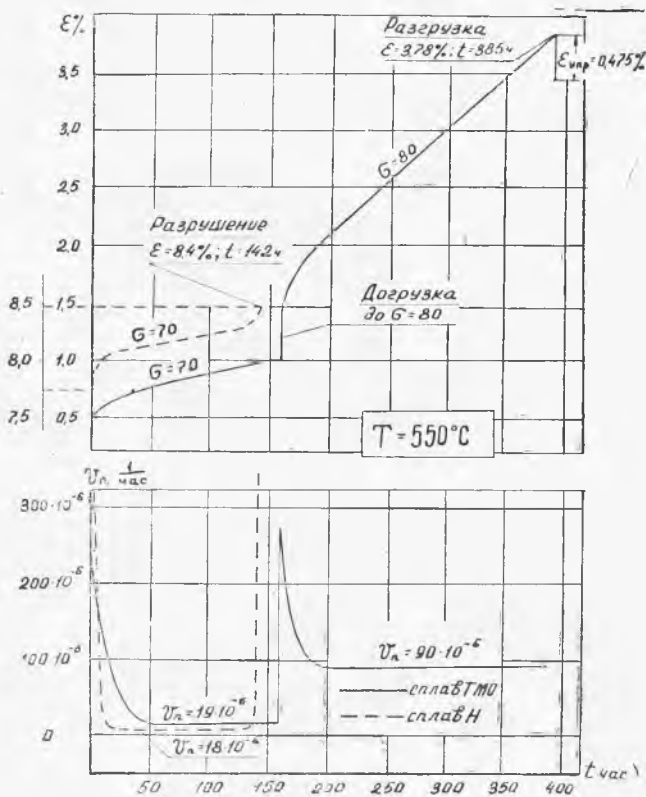
На фиг. 3 представлены кривые и скорости ползучести при $T = 550^{\circ}\text{C}$ и $\sigma_{нач} = 70 \text{ кг/мм}^2$.

Рассматривая фиг. 3, следует отметить, что при одинаковом сопротивлении ползучести на



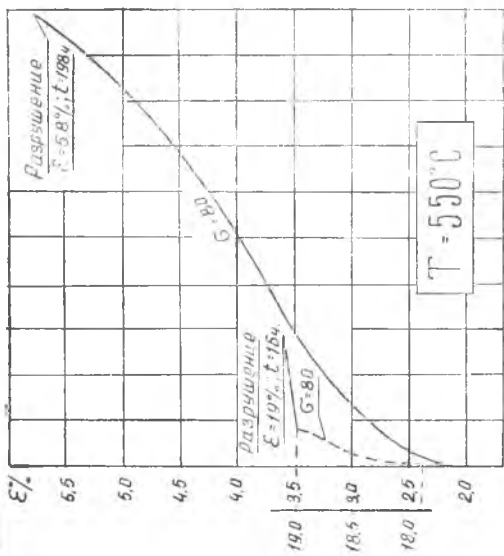
Фиг. 2.

I этапе образец Н не имеет II этапа работы (разрушение наступает при $t = 142$ час), в то время как образец ТМО не исчерпал возможности пластически деформироваться даже при более высоком напряжении, проработав $t = 385$ час без разрушения.

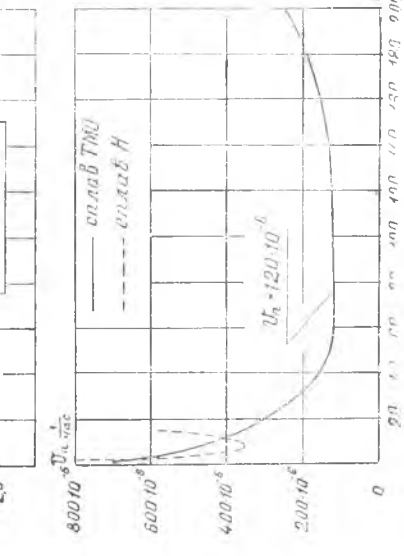
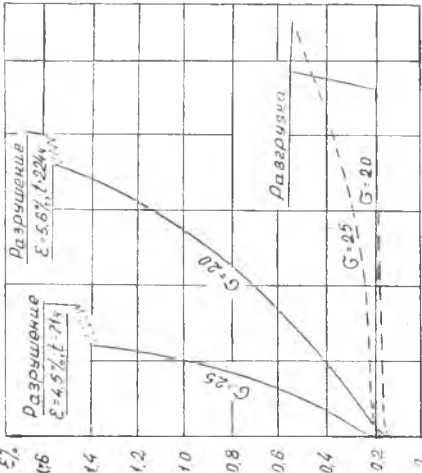


Фиг. 3.

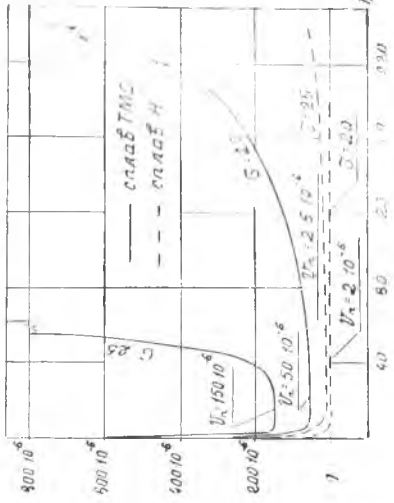
Из рассмотрения фиг. 4, на которой представлены кривые и скорости ползучести при $T=550^\circ$ и $\sigma=80$ кг/мм², следует, что кривые ползучести испытываемых образцов резко отличаются друг от друга по своему характеру. Кривая образца Н не имеет совсем участка установившейся ползучести, что свидетельствует об отсутствии вязкого течения. Когда деформация металла происходит с относительно большой скоростью и получает достаточное развитие, она протекает главным образом путем скольжения. В этом случае утрачивается уже понятие о ползучести в том смысле, в котором его используют для практических целей. Однако поведение образцов Н и ТМО в отношении роста пластиче-



Фиг. 4.



Фиг. 5.



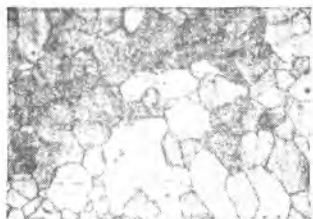
ской деформации при постоянной нагрузке* полезно просмотреть на опыте и здесь следует отметить явное преимущество образца ТМО перед образцом Н.

На основании всех опытов при $T=550^\circ$ следует, что предварительная тренировка материала эффекта упрочнения не обнаружила, что, вероятно, объясняется высоким уровнем тренировочных напряжений, вызывающих уже повреждаемость кристаллической решетки.

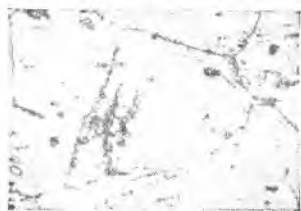
Результаты опытов при $T=750^\circ$ представлены на фиг. 5, из рассмотрения которой следует, что преимущество образца Н по сравнению с образцом ТМО бесспорно. Это вполне естественно в связи с тем, что $T=750^\circ$ находится выше порога разупрочнения для сплава ЭИ437.

Об этом можно судить по скорости ползучести на участках установившейся ползучести и по продолжительности самих участков.

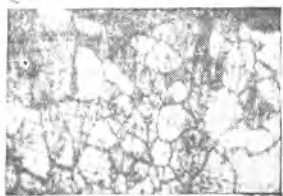
Так, например, при $\sigma=20 \text{ кг/мм}^2$ отношение скоростей ползучести образцов ТМО и Н составляет величину $\frac{v_{п\text{ТМО}}}{v_{п\text{Н}}} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} = 25$ при продолжительности участка установившейся ползучести для образцов ТМО равной ~ 30 часам, в то время, как при $\sigma=25 \text{ кг/мм}^2$ эти величины соответственно равны $\frac{v_{п\text{ТМО}}}{v_{п\text{Н}}} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 60$ и ~ 16 часам.



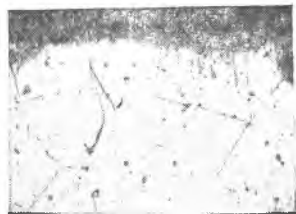
Фиг. 6.



Фиг. 7.



Фиг. 8.



Фиг. 9.

* В данном случае нельзя рассматривать этот опыт, как $\epsilon = f(t)$ для двух образцов при $\sigma = 80 \text{ кг/мм}^2 = \text{const}$. В результате наличия большой начальной деформации ($\epsilon_{\text{нач}} \approx 18\%$) у образца Н опыт $\epsilon = f(t)$ для него протекает при напряжении, существенно большем.

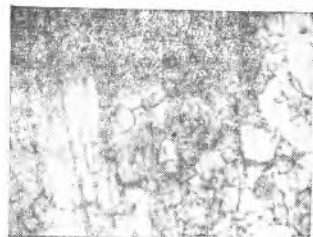
Исследование микроструктуры образцов после стандартной и термо-механической обработки выявило существенное отличие между ними.

Образцы ТМО (фиг. 6) имеют частично рекристаллизованную структуру с мелким зерном и отдельными деформируемыми зернами, в то время, как на образцах после стандартной термообработки прошел процесс собирательной рекристаллизации и выявляется крупнозернистая равноосная микроструктура (фиг. 7).

Разрушение всех образцов после испытания при $T=550^{\circ}\text{C}$ внутриверенного характера (фиг. 8, 9).



Фиг. 10.



Фиг. 11.

При $T=750^{\circ}\text{C}$ разрушение образцов со стандартной термообработкой имеет межзеренный характер (фиг. 10), в то время, как образцы с ТМО имеют разрушение смешанного характера (фиг. 11) с превалированием области межзеренного разрушения.

ВЫВОДЫ

1. При $T=550^{\circ}\text{C}$ в отношении сопротивления ползучести сплав ЭИ437Б с термо-механической обработкой имеет некоторое преимущество по сравнению со сплавом, имеющим стандартную термообработку.

2. При $T=750^{\circ}\text{C}$ сопротивление ползучести у сплава, имеющего стандартную термообработку, значительно выше по сравнению со сплавом, имеющим термо-механическую обработку.

3. При всех температурах испытания образец ТМО обладает большой способностью к пластическому деформированию под нагрузкой по сравнению с образцом Н, что свидетельствует о меньшей склонности образца ТМО к тепловому охрупчиванию.

4. Применение термо-механической обработки для сплава ЭИ437Б при рабочих температурах до $T=600^{\circ}\text{C}$ вполне целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Одинг и др. «Теория ползучести и длительной прочности металлов». 1959.
 2. К. Смит. Мортон «Основы физики металлов», 1962.
 3. Т. В. Курдюмов «Металловедение и обработка металлов» № 10, 1960.
-