

## О влиянии скорости деформирования на прерывистую текучесть и механические характеристики высокоазотистой стали

Н. А. Наркевич, Н. К. Гальченко, Е. И. Андреева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

*Выполнено экспериментальное исследование влияния скорости деформирования на прерывистую текучесть и механические характеристики высокоазотистой стали X23AG19Ф. Установлено, что в диапазоне скоростей деформирования  $4,62 \cdot 10^{-5} \dots 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  прерывистая текучесть, проявляющаяся в зубчатости диаграммы растяжения, определяется главным образом внутризеренными деформационными механизмами. В условиях испытаний со скоростью, превышающей  $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , преобладающими являются совместные деформационные моды, что приводит к изменению характера прерывистой текучести и преобразованию зубчатой диаграммы в волнистую с существенным повышением предела текучести стали.*

**Ключевые слова:** прерывистая текучесть, скорость деформирования, высокоазотистая сталь, механические свойства, структура поверхностного рельефа.

**Введение.** Анализ работ [1–4] свидетельствует о том, что явление прерывистой текучести характерно для разного рода металлов, сталей и сплавов в моно- и поликристаллическом состояниях при отрицательной и комнатной температурах. Накоплен значительный экспериментальный материал по исследованию прерывистой текучести сплавов на основе алюминия, меди, никеля [1–3]. Менее изучены сплавы внедрения, в частности, хромомарганцевые и марганцевые стали, легированные азотом, в которых прерывистая текучесть проявляется при определенных условиях деформирования. Исследования [5–7] сплавов X17AG18Ф2, X17AG18Ф, X17AG18, деформированных прокаткой при комнатной температуре в интервале  $\varepsilon = 10 \dots 95\%$ , показали, что особое влияние на дислокационную структуру и механические свойства сплавов при холодной пластической деформации оказывают механическое двойникование и деформационные  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$  превращения: мартенситное и по механизму Бейна. При изучении скоростной зависимости свойств высокомарганцевой стали Г18 установлено [4], что с увеличением содержания азота и уменьшением скорости деформирования на диаграммах растяжения начинает проявляться прерывистая текучесть. Зубчатые участки при 1,5%-ной концентрации азота в стали обнаруживаются при относительно большой деформации, а в сплавах с содержанием азота менее 1,5%, они образуются по достижении предела пропорциональности. С изменением скорости деформирования форма и величина скачков может уменьшаться вплоть до их исчезновения.

Целью настоящей работы является изучение механических свойств и особенностей проявления прерывистой текучести в легированной азотом стали в зависимости от скорости деформирования.

**Материал и методики исследований.** Материалом для исследования послужила сталь X23AG19Ф, содержащая 0,8% азота. После термообработки (закалка от 1200°C в воде), сталь имеет аустенитную структуру с включениями нитридов ванадия. Неравномерность распределения включений приводит к разнотекучности. При среднем размере зерна 40 мкм значительную долю площади шлифа занимают зерна размером 8–10 мкм, однако часто встречаются 80–100-микронные зерна.

Для механических испытаний использовались плоские образцы с размером рабочей части  $18 \times 3 \times 0,5$  мм, вырезанные электроискровым способом и обработанные методом электрополировки. Испытания на статическое растяжение проводили на машине «Instron» при комнатной температуре, варьируя скорость деформирования в диапазоне  $4,62 \cdot 10^{-5} \dots 4,62 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Структуру деформированных образцов исследовали на металлографическом микроскопе МИМ-9.

**Обсуждение результатов.** В процессе испытания образцов наблюдалась равномерная деформация, локализуемая непосредственно перед разрушением (без ярко выраженной шейки). В исследуемом интервале скоростей деформирования установлен характерный для высокопрочных сплавов вид диаграммы растяжения, однако на стадии параболического упрочнения наблюдалось появление на диаграмме зубчатых и волнообразных участков, чередующихся с участками непрерывно возрастающего напряжения, что свидетельствует о возникновении прерывистого течения (рис. 1). Варьирование скорости деформирования приводит к изменению механических характеристик. С увеличением скорости от  $4,62 \cdot 10^{-5}$  до  $4,62 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  предел прочности стали уменьшается почти на 10%, относительное удлинение – на 15%, предел текучести увеличивается на 19% (рис. 2). Рост скорости деформирования вызывает преобразование зубчатой диаграммы в волнистую, при этом протяженность участков диаграммы, не содержащих никаких осцилляций, уменьшается. Для всех скоростей деформирования характерно появление первого зубца при напряжении, значительно превышающем условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (рис. 2). С ростом скорости деформирования напряжение, вызывающее первый скачок на кривой, и следовательно, деформация, соответствующая этому скачку, увеличиваются.

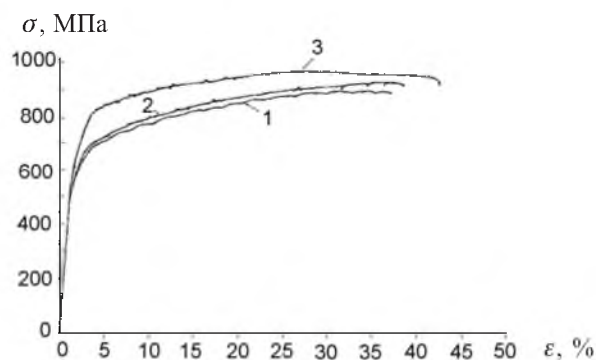


Рис. 1. Диаграммы растяжения стали X23AG19Ф, испытанной со скоростью  $4,63 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  (1),  $9,28 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  (2),  $4,62 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  (3).

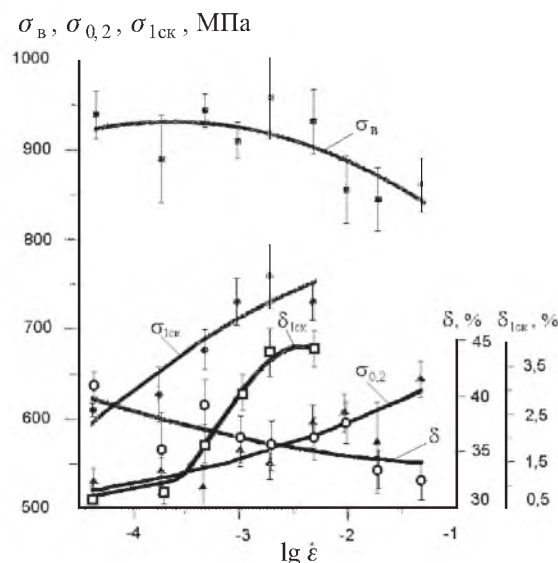


Рис. 2. Влияние скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$  на предел прочности  $\sigma_{\text{в}}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$ , напряжение первого скачка  $\sigma_{1\text{ск}}$ , деформацию, соответствующую появлению первого скачка  $\delta_{1\text{ск}}$ .

Причины прерывистой текучести в легированных азотом сталях могут быть разными. Механическое двойникование, интенсивно развивающееся в сплавах с низкой энергией дефекта упаковки, фазовые  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$  превращения [6, 8] вызывают повторяющиеся срывы напряжения. В то же время установлено [1, 3], что преодоление дислокационными скоплениями препятствий в виде атомов азота, внедренных в решетку аустенита, а также взаимодействия дислокаций с внутренними концентраторами [3] приводят к возникновению напряжений, близких к теоретической прочности при сдвиге и могут провоцировать резкие скачки напряжения на диаграмме растяжения. Такие взаимодействия происходят в локальных микрообъемах и, инициируя прерывистое течение, предотвращают катастрофическое разрушение образца.

Анализ экспериментальных данных по определению абсолютного удлинения образца за время единичного скачка позволяет утверждать, что эта величина сопоставима с величиной исходного аустенитного зерна и составляет от 2 до 25 мкм. Анализ зависимости удлинения образца за один скачок от скорости растяжения показал, что с ростом скорости деформирования абсолютное удлинение, обусловленное единичным скачком, увеличивается, а значит, суммарная протяженность области скачков, при существенном уменьшении их количества, возрастает и составляет 0,025–0,083% от относительного удлинения образца (рис. 3). Появление волнообразных участков на диаграммах растяжения при относительно равных скоростях деформирования (рис. 1), очевидно, обуславливается совместным влиянием множества зерен на развитие дефектной структуры стали. Расстояние между двумя максимумами или минимумами волнистой линии, наблюдаемой при скоростях деформации от  $4,62 \cdot 10^{-3}$  до  $4,63 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , соответствует абсолютному удлинению образца на 500–600 мкм. Сопоставление этой вели-

чины с размером исходного аустенитного зерна подтверждает предположение о совместном вкладе в процесс деформации конгломератов зерен, деформирующихся как единое целое.

Исследование поверхности образцов после испытаний показало, что при малых скоростях деформирования ( $4,62 \cdot 10^{-5} - 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) наблюдается зеренная структура с множеством пересекающихся линий и полос скольжения (рис. 4,а). В некоторых зернах в направлении, перпендикулярном направлению растяжения, образуются микротрещины. Эти трещины распределены равномерно по длине образца и могут распространяться на два-три зерна, образуя ступеньки на межзеренных границах, что в свою очередь способствует формированию зубчатости на диаграммах растяжения.

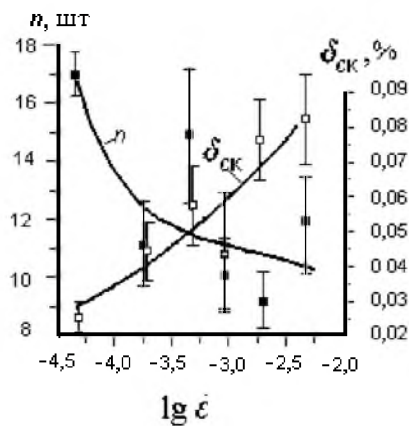


Рис. 3. Общая протяженность области скачков на диаграмме растяжения в зависимости от относительного удлинения  $\delta_{ск}$  и количество скачков  $n$  в зависимости от скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ .

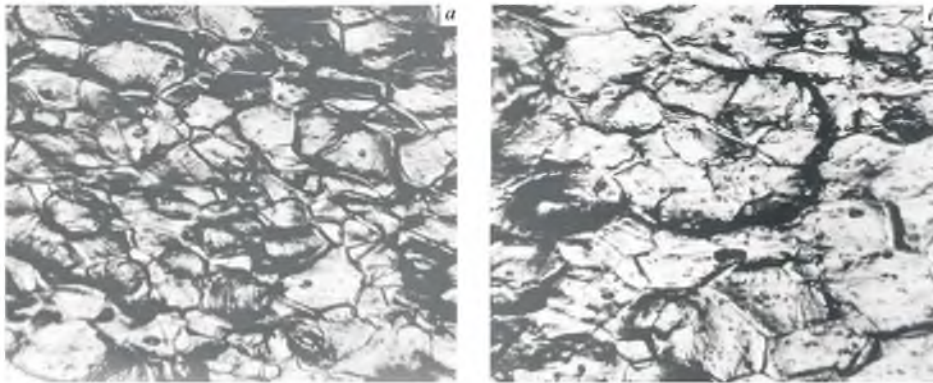


Рис. 4. Деформационный рельеф поверхности стали X23АГ19Ф после испытаний на растяжение со скоростью  $1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  (а)  $\times 125$ ;  $4,63 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  (б),  $\times 125$ .

Таким образом, скачки напряжения при малых скоростях деформирования и комнатной температуре являются следствием активно идущих внутризеренные деформационных процессов: дислокационного скольжения, механического двойникования, мартенситного превращения и растрескивания с участием границ зерен как накопителей дефектов.

Структура поверхностного рельефа образцов, испытанных в условиях больших скоростей растяжения ( $1,85 \cdot 10^{-2} - 4,63 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) существенно отличается. Помимо внутризеренных линий скольжения, наблюдаются полосы с высокой дефектностью, проходящие по границам нескольких зерен (рис. 4,б). Эти полосы могут замыкаться, распространяться вдоль или поперек образца, образуя шероховатую поверхность. При этом границы отдельных зерен изменяются незначительно в процессе деформирования. Транскристаллитные трещины встречаются редко, а на отдельных образцах полностью отсутствуют.

**Заключение.** Изменение скорости деформирования влияет на условия развития дефектной структуры и, как следствие, на вид диаграммы растяжения и механические свойства высокоазотистой стали. При растяжении образцов из стали Х23АГ19Ф со скоростью деформирования  $4,62 \cdot 10^{-5} - 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  прерывистая текучесть, проявляющаяся в зубчатости диаграммы, определяется главным образом внутризеренными деформационными механизмами. В условиях испытаний со скоростью, превышающей  $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , преобладающими являются совместные деформационные моды (типы разрушения), что приводит к изменению характера прерывистой текучести и преобразованию зубчатой диаграммы растяжения в волнистую. С увеличением скорости деформирования до  $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  существенно повышается предел текучести стали. Так, при пластичности 33% и пределе прочности 850 МПа его величина достигает 635 МПа.

## Резюме

Виконано експериментальне дослідження впливу швидкості деформування на переривчасту текучість та механічні характеристики високоазотистої сталі Х23АГ19Ф. Виявлено, що у діапазоні швидкостей деформування  $4,62 \cdot 10^{-5} \dots 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  переривчаста текучість, що на діаграмі розтягу має зубчатий вид, зумовлена головним чином внутрішньозеренними деформційними механізмами. В умовах випробувань зі швидкістю деформування вищою за  $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  переважають спільні деформційні моди, що приводить до зміни характеру переривчастої текучості та перетворення зубчастої діаграми у хвилясту із суттєвим підвищенням границі текучості сталі.

1. Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. – М.: Металлургия, 1975. – 328 с.
2. Воробьев Е. В. Влияние скорости деформирования на прочность и деформативность сплавов при температуре 4,2 К // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 84 – 92.
3. Korbel A. and Dybiek H. The problem of the negative strain-rate sensitivity of metals under the portevin-lechatelier deformation conditions // Acta Met. – 1981. – 29. – P. 89 – 93.



4. *Бащенко А. П., Белоусов Г. С., Омельченко А. В. и др.* Упрочнение высокомарганцевого аустенита азотом // *Физическая мезомеханика*. – 1989. – **67**, вып. 4. – С. 793 – 796.
5. *Дубовик Н. А., Зуев Л. Б., Пак В. Е.* О природе упрочнения высокоазотистых сталей на основе железохромомарганцевого аустенита // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1997. – № 10.
6. *Литовченко И. Ю., Тюменцев А. Н., Пинжин Ю. П. и др.* Особенности переориентации кристаллической решетки и механизм локализации деформации в высокоазотистых аустенитных сталях в условиях их фазовой неустойчивости в полях неоднородных напряжений // *Физическая мезомеханика*. – 2000. – **3**, № 3. – С. 5 – 14.
7. *Дубовик Н. А., Зуев Л. Б.* Эволюция дислокационной структуры в высокоазотистых аустенитных сталях // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1992. – № 4.
8. *Панин В. Е., Строкатов Р. Д.* Динамика мезоскопической структуры и сверхпластичность аустенитных сталей и сплавов // *Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В. Е. Панина*. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – С. 208 – 240.

Поступила после доработки 01. 11. 2002