

**ЗАМЕЧАНИЯ О ФОРМЕ КРИВОЙ НАГРУЗКА-УДЛИНЕНИЕ ДЛЯ МЯГКОЙ СТАЛИ В РАЙОНЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ***Р. Аттермо, Г. Остберг**(Стокгольм, Швеция)*

Проведен анализ «зуба» в области нагружения на кривой нагрузка — удлинение для мягкой стали в связи с взаимодействием между локализованной пластической деформацией полос Людерса<sup>1</sup> и упругой податливостью окружающих участков растягиваемого образца.

**1. Введение.** Приведенные ниже замечания о пределе текучести на кривой нагрузка — удлинение получены при испытаниях на растяжение мягкой стали и касаются соответствия между разрывами на кривой и неоднородностью деформации. Последняя относится только к макроскопическим эффектам, наблюдаемым непосредственно на растягиваемом образце, а не к происходящим при этом дислокационным процессам.

**2. Детали эксперимента.** Исследовалась мягкая сталь, содержащая 0.10% С, 0.2% Si, 0.46% Mn, 0.011% P и 0.035% S. Образцы для растяжения имели круглое сечение диаметром 10 мм и различную длину рабочей части (60, 96 и 200 мм). При растяжении использовалась машина Инстрона с «жестким» нагружением. Связь головок с машиной осуществлялась при помощи захвата со скрещенными ножами. Скорость удлинения во время испытания была постоянной и составляла от 0.1 до 10 мм / мин. Регистрирующее устройство давало возможность измерять изменения нагрузки в интервале скоростей до  $1.3 \cdot 10^6$  кг / сек. Эта чувствительность была достаточной для того, чтобы следить за падением нагрузки в районе предела текучести, которое происходит при скоростях в интервале от  $1.8 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^5$  кг / сек.

Для того чтобы наблюдать локализованную деформацию в форме полос Людерса во время удлинения при пределе текучести, поверхность образцов покрывалась слоем лака. Наличие полосы Людерса определялось по растрескиванию лака, покрывающего полосу.

**3. Наблюдения.** Для анализа кривой нагрузка  $p$  — удлинение  $\epsilon$  при пределе текучести (фигура) следует отметить следующие результаты наблюдений. Каждый максимум или падение нагрузки в части кривой, соответствующей пределу текучести, как было обнаружено, соответствует образованию новой полосы Людерса. С другой стороны, обнаружено небольшое число полос Людерса, не приводящих к возникновению разрывов на кривой. Первый максимум всегда имел наибольшую величину, высота следующих максимумов менялась нерегулярно.

В месте падения нагрузки кривая имеет конечный возрастающий наклон вплоть до минимума или уровня нижнего предела текучести, иногда наблюдается более или менее заметная прерывистость кривой. При увеличении рабочей длины образца начальная часть кривой становится зигзагообразной. Число максимумов уменьшается с ростом скорости удлинения, в то же время происходит увеличение общего удлинения при пределе текучести и высоты максимума по отношению к минимуму на кривой.

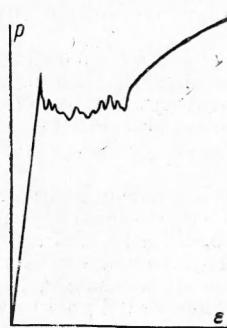
**4. Обсуждение.** Первое падение напряжения у предела текучести является следствием возникновения пластической деформации путем образования полосы Людерса. В то же время удлинение, регистрируемое между максимумом и последующим минимумом, является частью деформации за счет полосы Людерса. Части образца, окружающие полосу Людерса, при этом еще остаются в упругом состоянии. Удлинение при испытаниях на растяжение идет с постоянной скоростью по отношению ко всему образцу, поэтому локализованная деформация в полосе Людерса ведет к сжатию упруго напряженных участков образца и, следовательно, — к релаксации напряжений. Уменьшение нагрузки происходит также потому, что напряжение, необходимое для деформации в полосе Людерса, ниже, чем напряжение, соответствующее верхнему пределу текучести. Таким образом, в то время как удлинение во время падения нагрузки определяется деформацией в полосе Людерса (за вычетом некоторого упругого сокращения остальных частей образца), нагрузка определяется релаксацией упругих напряжений вследствие быстрого локализованного течения, а также напряжением, необходимым для деформации в полосе Людерса<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> В отечественной литературе обычно употребляют термин «полосы Чернова — Людерса».

<sup>2</sup> Следует, однако, отметить, что существование верхнего и нижнего пределов текучести не всегда связано с обязательным падением нагрузки [1]. Когда растягиваемый образец начинает пластически деформироваться, скорость возрастания нагрузки, необходимой для поддержания постоянной скорости удлинения, падает. Машины для испытаний на растяжение в различной степени способны к такому изменению условий нагружения, поэтому может происходить уменьшение скорости удлинения. Напряжение, необходимое для пластической деформации, уменьшается с уменьшением скорости деформации [2], поэтому соответствующий эффект на кривой нагрузка — удлинение заключается в падении нагрузки.

Зависимость наклона области падения нагрузки на кривой от упругого сжатия участков образца, окружающих полосу Людерса, подтверждается результатами наблюдений изменений наклона кривой с изменением рабочей длины образца. Разрывы в наклоне кривой в области падения напряжений, отмеченные выше, по-видимому, отражают изменения в скорости или направлении распространения полосы Людерса.

Рост нагрузки, необходимой для дальнейшей деформации, связанной с полосой Людерса, превышающей минимальную деформацию, показывает, что имеет место деформационное упрочнение. Этот вывод подтверждается результатами, полученными Илэм [3]. Нагрузка деформировала образец для испытаний на растяжение несколько дальше, чем необходимо для достижения верхнего предела текучести, что приводило к образованию полосы Людерса, а затем разгружала образец. При повторной нагрузке и последующих разгрузке и нагрузке было обнаружено, что удлинение, соответствующее полосе Людерса, сначала возникает при постоянной нагрузке при нижнем пределе текучести, а затем увеличивается при повышении нагрузки.



Обычно на графиках нагрузка - удлинение не наблюдаются одинаковые ровные горизонтальные участки, соответствующие распространению полос Людерса при отсутствии деформационного упрочнения. В соответствии с интерпретацией падения нагрузки, приведенной выше, это должно быть связано с последствием в упруго-деформированных участках образца. Таким образом, искривленный участок экспериментальной кривой, соответствующий минимальной нагрузке, не обязательно является истинным нижним пределом текучести, соответствующим минимальному напряжению, необходимому для деформации, связанной с полосой Людерса.

Меньшая высота максимума, следующего за верхним пределом текучести, по сравнению с высотой максимума у верхнего предела текучести, может быть объяснена на основе эффекта активации, необходимой для начала образования полосы Людерса и зависящей от напряжения и времени.

Напряжение, необходимое для начала распространения полосы Людерса, должно уменьшаться с увеличением времени выдержки образца при большом напряжении. Это также объясняет наблюдение, согласно которому увеличение скорости удлинения приводит к росту различий между максимумом и минимумом на кривой и уменьшению числа максимумов.

Тот факт, что общее удлинение, соответствующее пределу текучести, растет с увеличением скорости удлинения, может быть связан с меньшей степенью деформационного упрочнения полосы Людерса вследствие меньшей величины отношения площади поверхности к объему для каждой полосы, что важно для диссипации тепла, выделяющегося при быстрой деформации.

Как указывалось во введении, настоящий анализ не затрагивает фундаментальных аспектов деформации. Следует только отметить, что Хан вывел уравнение, описывающее форму кривой напряжение — деформация для мягкой стали на основе дислокационной модели [1]. Графическое представление этого уравнения дает кривую, которая близка к экспериментально полученной кривой напряжение — деформация для мягкой стали. Однако это не делает неправильным приведенное рассмотрение, так как Хан не рассматривает взаимосвязи между различными областями, где происходят как упругая, так и пластическая деформации, что сделано в настоящей работе.

Авторы выражают благодарность Г. Лагербергу — за обсуждение во время подготовки рукописи, а также руководству Atomenergi за разрешение опубликовать эту работу. Исследованная сталь была бесплатно предоставлена заводом Фагерста.

Поступила 5 IV 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M a l m b e r g G. The yield point, some remarks on its nature and its determination (Sträckgränsen, narga synpunkter på dess karaktär och dess bestämning) Jernkont. Annaler, 1937, vol. 121, p. 249—295.
2. B o l l i n g G. F. H a y s L. E., W i d e r s i c h H. W. Pseudo yield point effects. Acta metallurgica, 1961, vol. 9, 6, p. 622—624.
3. E l a m C. F., The influence of rate of deformation on the tensile test with special reference to the yield point in iron and steel. Proc. Roy. Soc. A, 1938, vol. 165, p. 568—592.
4. H a h n G. T. A model for yielding with special reference to the yield — point phenomena in iron and related BCC metals. Acta metallurgica, 1962, vol. 10, 8, p. 727—738.