

кель-хромовых покрытий магнитным методом // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 34–39.

3. С.В. Вонсовский и Я.С. Шур. Ферромагнетизм, Гос. изд-во тех.-теор. лит-ры, М. – Л., 1948. – 816 с.

УДК 620.178

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Крень А.П., Ланцман Г.А., Рудницкий В.А.

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Предел текучести σ_T является одной из механических величин, измерение которой обязательно при проведении технического диагностирования потенциально опасного промышленного оборудования: трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, изделий машиностроения и др. В большинстве случаев для определения величины σ_T используются специальные образцы, заготовки для изготовления которых вырезаются из основного металла (или сварного соединения). В дальнейшем данные образцы разрушаются на испытательных машинах для получения диаграммы растяжения и расчета значения σ_T . При этом в зависимости от характера деформирования определяют физический или условный предел текучести, но не разделяют эти понятия при проведении прочностных расчетов, называя оба из них просто пределом текучести. Неизбежное повреждение металла изделия требует впоследствии расходов на проведение ремонта, а изготовление образцов также является довольно затратным по времени процессом. В этой связи, проведение исследований по созданию неразрушающего метода контроля предела текучести является актуальным направлением для промышленности.

В данной работе рассматривается возможность неразрушающего контроля предела текучести сталей, основанная на обработке данных диаграммы динамического вдавливания сферического индентора в испытуемый материал. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование части диаграммы ударного вдавливания, охватывающей две стадии: чисто упругое и упругопластическое деформирование.

В настоящей работе предлагается подход, заключающийся в определении σ_T для некоторой заданной остаточной деформации, при которой в материале создаются пластические деформации, близкие к $\varepsilon = 0,002$ (0,2 %), соответствующей условному пределу текучести при растяжении для материалов без выраженной площадки текучести. В этом случае результат определения σ_T практически не будет зависеть от коэффициента деформационного упрочнения n .

Рассмотрено использование этого подхода при условии использования динамических диа-

грамм внедрения индентора в металл. Как правило, в записываемых диаграммах вдавливания, в координатах «контактное усилие F – глубина внедрения h » (рисунок 1), стадия чистой упругой деформации занимает очень малую часть в общей деформации, и выделить ее из получаемых зависимостей очень сложно.

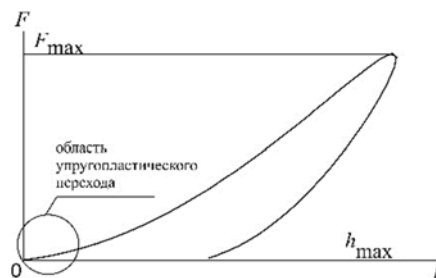


Рисунок 1 – Типичная диаграмма вдавливания

Возможность точной регистрации упругопластического перехода повышается, если следовать результатам работ [1, 2], где было установлено, что, хотя начало пластического течения имеет место при $P_m/\sigma_T = 1,07$ (P_m – среднее контактное давление), практическое проявление пластической деформации происходит при $P_m/\sigma_T = 1,6$. Если воспользоваться зависимостью $\frac{P_m}{\sigma_T} = f\left(\frac{E^* d_c}{\sigma_T D}\right)$, приведенной в [3], и формулой (1), то для значений $E^*/\sigma_T = 250 \div 500$, эта величина будет соответствовать приближительному значению деформации $0,2 \div 0,6$ %. При этом, как показано в [2] использование значения 1,6 вместо 1,07 дает погрешность в оценке предела текучести материалов от -3,1 до +3,3 % от справочного значения σ_T .

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d_c}{D} \quad (1)$$

Данные результаты говорят о том, что диапазон, в котором реально может фиксироваться переход от упругой к упругопластической деформации при индентировании может быть расширен, поскольку начальная стадия микропластичности практически не будет оказывать влияния на процесс движения индентора, а значит и на диаграмму вдавливания. Поэтому для расчета σ_T оценивалось среднее контактное давление для точки диаграммы, где $d_c/D = 0,03$ ($\varepsilon = 0,6$ %):

$$P_m = 4F / (\pi d_c^2) \quad (2)$$

которое считалось равным динамическому пределу текучести, имеющему связь со статическим σ_T , определяемому при разрушающих испытаниях.

Экспериментальные исследования для определения динамического предела текучести осуществлялись с помощью прибора, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Для того, чтобы фиксировать переходную область от упругого до упругопластического вдавливания, диаметр сферы индентора D был выбран равным 12 мм, а кинетическая энергия удара варьировалась в пределах $0,18 \div 1,9$ мДж. В результате испытаний были получены диаграммы вдавливания в координатах $F = f(h)$, которые затем преобразовывались в кривые зависимости среднего давления $P_m = f(d_c/D)$ (рисунок 2).

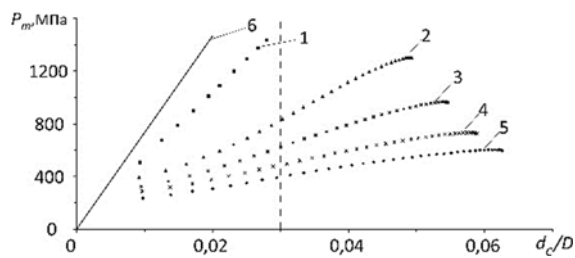


Рисунок 2 – Зависимости среднего давления P_m от соотношения d_c/D для упругопластического вдавливания (кривые 1–5), и теоретическая зависимость (кривая 6) согласно уравнению Герца

Для определения σ_T принималось соотношение $d_c/D = 0,03$ ($\varepsilon = 0,6\%$), отмеченное вертикальной линией (рисунок 2), по которому определялось соответствующее ему среднее контактное давление $P_{m(0,6)}$, пропорциональное σ_T . Выбранная величина деформации, как показано при теоретическом рассмотрении, соответствует диапазону, в котором начинают значимо проявляться пластические деформации при индентировании, поэтому определенное по рисунку 2 значение $P_{m(0,6)}$ считалось равным динамическому пределу текучести σ_T^d .

На рисунке 3 приведена зависимость, связывающая динамический σ_T^d и статический σ_T пределы текучести. Истинное значение σ_T получали путем разрушающих испытаний стандартных образцов на разрыв.

На графике также нанесены доверительные интервалы при доверительной вероятности 0,90. Как видно из графиков, доверительный интервал при определении величины σ_T исходя из значений $P_{m(0,6)}$ составляет 40 МПа (погрешность измерения не превысила 60 МПа или 13% во всем диапазоне). Зависимость, представленная на рисунке 3 описывается уравнением $\sigma_T = 1,82 \cdot \sigma_T^d - 529$.

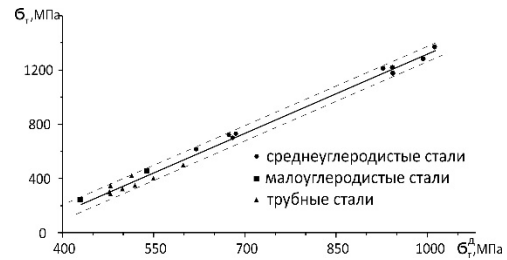


Рисунок 3 – Связь динамического предела текучести σ_T^d со статическим пределом текучести σ_T . Штриховые линии – границы доверительного интервала

Также можно отметить, что для мягких сталей динамический предел текучести σ_T^d гораздо выше по сравнению со статическим σ_T , при чем разность между ними уменьшается с ростом статического предела текучести и при высоких значениях σ_T пределы текучести близки по величине. При этом для твердых образцов σ_T^d даже несколько ниже σ_T , что означает, что при этой энергии удара материал не достиг значимых пластических деформаций при индентировании. Эти результаты полностью согласуются с литературными данными [4].

Предложенные алгоритмы позволяют получить достаточно достоверные значения предела текучести, что подтверждается проведенными экспериментами на широком круге материалов: низко-, среднеуглеродистых и трубных сталях.

К достоинствам разработанных теоретических положений следует отнести использование динамического индентирования, не требующего создания замкнутой силовой системы для нагружения материала, что позволяет проводить контроль непосредственно стальных изделий без их разрушения.

Разработанные теоретические положения, базирующиеся на основах механики контактно-взаимодействия упругопластичных материалов с жестким индентором, доказавших свою эффективность при описании деформирования сталей различного класса.

Литература

1. Mesarovic S.D., Fleck N.A. Spherical indentation of elastic-plastic solids // Proc. Royal Soc. Lond. 1999. V. 45. P. 2707–2728.
2. Herbert E.G. On the measurement of stress-strain curves by spherical indentation // Thin solid films. 2001. P. 331–335.
3. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985. 452 p.
4. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2013. – 224 с.