

УДК 620.172.251.222

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

© М. М. Матлин, Н. Г. Дудкина, Н. Э. Самойлов¹*Статья поступила 9 июля 2014 г.*

Описана методика определения предела текучести материалов, основанная на определении диаметра зоны наплыва вокруг отпечатка при внедрении индентора в форме конуса с углом заострения 90° с постоянной нагрузкой. Диаметр зоны наплыва определяется путем регистрации глубины отпечатка и высоты зоны наплыва от исходной поверхности. Методика предназначена для инженерных расчетов на прочность и оценки прочностных свойств материалов.

Ключевые слова: предел текучести; диаметр; зона наплыва; конус; сталь.

Когда напряжения, действующие в пластичном материале металлоизделий, достигают предела текучести, возникает критическая ситуация, поскольку при этом необратимо изменяются размеры, а также формы деталей. Очевидно, что при расчете на прочность деталей машин (при проектировании, восстановлении или ремонте) необходимо располагать достоверными данными о прочностных свойствах материала. При этом определять прочностные характеристики стандартными испытаниями на растяжение [1] во многих случаях нецелесообразно, поскольку они предусматривают вырезку образцов из деталей, которые становятся непригодными к дальнейшей эксплуатации. При малом размере контролируемых деталей или необходимости их сплошного контроля указанные стандартные испытания реализовать вообще невозможно.

Основа методов неразрушающего оперативного контроля прочностных свойств заложена в работе [2], в которой показана возможность построения полной диаграммы растяжения по результатам измерения твердости испытуемого металла при внедрении сферического индентора. К числу первых в этой области относятся также публикации [3, 4]. В статье [5] отмечено, что в результате экспериментального исследования выявлено наличие связи между различными числами твердости и прочностными свойствами ряда конструкционных сталей. В работах [6, 7] предложен метод определения предела текучести по результатам внедрения сферического индентора, базирующийся на аналитических закономерностях [8], устанавливающих связь интенсивностей напряжений и деформаций в центре площадки контакта с напряжениями и деформациями при одноосном растяжении. В монографии [9] описан метод определения предела текучести по значению твердости по Бринеллю $HB_{0,2}$, измеренной на пределе текучести, а в статье [10] указан-

ный метод обоснован для сталей, упрочненных термически или наклепанных холодной пластической деформацией.

Принципиальная возможность определения предела текучести путем внедрения в испытуемый материал конического индентора (с углом при вершине 90°) показана в работе [11], согласно которой

$$\sigma_{0,2} = \frac{P}{\pi R^2}, \quad (1)$$

где P — нагрузка на конический индентор; R — радиус зоны распространения пластической деформации (наплыва) на испытуемой поверхности. Приемлемость этого метода была экспериментально подтверждена [12], однако основная сложность при этом [2] состоит в достаточно точном экспериментальном определении сильно размытых, как правило, границ наплыва (радиуса наплыва R).

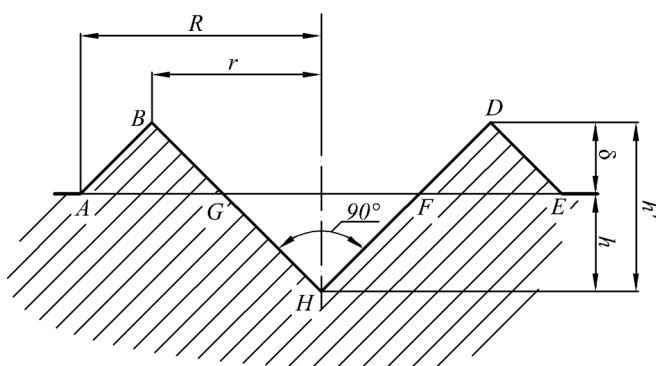
В данной работе описан усовершенствованный вариант [13] указанного метода, в котором исключена необходимость экспериментального определения радиуса наплыва R . При этом необходимо измерять высоту δ наплыва и глубину отпечатка h (от исходной поверхности) с последующим вычислением радиуса наплыва R и использованием известного условия «постоянства объема» при пластической деформации и конусообразной формы наплыва при статическом внедрении конического индентора.

На рисунке показано поперечное сечение отпечатка, получаемого при внедрении конуса. При этом приняты следующие допущения:

1) объем вытесненного из лунки металла равен объему образовавшейся лунки, что соответствует указанному выше условию «постоянства объема» при пластической деформации;

2) угол при вершине остаточного отпечатка равен углу (90°) при вершине конического индентора.

¹ Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия; e-mail: matlin@vstu.ru



Поперечное сечение остаточного отпечатка, образованного коническим индентором

Очевидно, что снятие нагрузки с конического индентора сопровождается упругим восстановлением отпечатка. При этом изменение его диаметра незначительно [14], а наиболее интенсивно восстанавливается глубина отпечатка на оси вдавливания индентора. В результате угол при вершине остаточного отпечатка оказывается несколько больше угла при вершине индентора. В то же время, как показано в работе [15], это увеличение угла действительно относительно невелико и составляет от 0,8 до 4 % при изменении твердости HV от 1000 до 5000 МПа.

Условие «постоянства объема» подразумевает (см. рисунок) равенство объемов конического отпечатка (GHE) и образовавшегося кольцевого наплыва (ABG и FDE). Для упрощения получаемых расчетных зависимостей добавим в тот и другой указанные объемы один и тот же объем усеченного конуса $BGFD$. В результате из соотношения геометрических параметров, показанных на рисунке, с учетом равенства объемов

$$V_{ABDE} = V_{BHD}, \quad (2)$$

получим

$$\frac{1}{3} \pi \delta (r^2 + rR + R^2) = \frac{1}{3} \pi r^2 h' = \frac{1}{3} \pi r^3 \operatorname{ctg} 45^\circ, \quad (3)$$

где r — радиус отпечатка на гребне наплыва; R — радиус основания наплыва; δ — высота зоны наплыва от исходной поверхности; $h' = h + \delta$ (h — глубина отпечатка от исходной поверхности).

Из формулы (3) следует, что

$$r^2 + rR + R^2 = r^3 / \delta, \quad (4)$$

при этом

$$r = h' = h + \delta. \quad (5)$$

После преобразований формулы (4) с учетом равенства (5) получим

$$R^2 + R(h + \delta) + (h + \delta)^2 \left(1 - \frac{h + \delta}{\delta} \right) = 0. \quad (6)$$

Решая квадратное уравнение (6), найдем зависимость для определения радиуса основания наплыва:

$$R = (h + \delta) \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4h}{\delta}} + 1 - 1 \right) \right]. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) формула (1) примет следующий вид:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{P}{\pi \left[\frac{h + \delta}{2} \left(\sqrt{\frac{4h}{\delta}} + 1 - 1 \right) \right]^2}. \quad (8)$$

Экспериментальную проверку описанного метода проводили с использованием образцов, изготовленных из различных сталей. В качестве примера в таблице показаны результаты испытаний образцов из сталей 30, 45, 40X. Предел текучести $\sigma_{0,2\text{ГОСТ}}$ определяли по стандартной методике [1] с помощью программно-испытательного комплекса ИР-5143 – 200. Для реализации разработанного метода применяли конус с углом при вершине 90° , изготовленный из твердого сплава. Внедрение конуса в испытуемый материал образца проводили с помощью прибора Роквелла ТК2 при рабочей нагрузке $P = 1471,5$ Н. После снятия нагрузки регистрировали максимальную высоту наплыва δ и глубину остаточного отпечатка h (см. рисунок) индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм. Максимальную высоту наплыва δ дополнительно измеряли с помощью микроскопа МИМ-7 по расфокусировке изображения краев отпечатка относительно исходной поверхности. Каждый опыт повторяли пять – семь раз и определяли средние значения измеряемых параметров h и δ , по которым согласно формуле (7)

Значения условного предела текучести, определенные предлагаемым ($\sigma_{0,2}$) и стандартным ($\sigma_{0,2\text{ГОСТ}}$) методами

Материал образца, $\sigma_{0,2\text{ГОСТ}}$ МПа	Результаты измерения		Результаты расчета		$\frac{\sigma_{0,2\text{ГОСТ}} - \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2\text{ГОСТ}}} \cdot 100 \%$
	h , мм	δ , мм	R , мм	$\sigma_{0,2}$ МПа	
Сталь 30; 230	0,450	0,035	1,515	208	9,5
Сталь 45; 370	0,310	0,022	1,090	402	–8,6
Сталь 40X; 750	0,195	0,011	0,770	805	–7,4

вычисляли величину радиуса основания наплыва R , а затем по формуле (8) — значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$.

В таблице представлены результаты определения условного предела текучести указанных выше сталей по ГОСТ 1497–84 [1] и с помощью предложенного метода.

Статистическая обработка экспериментальных результатов показала, что для исследованных сталей математическое ожидание ошибки определения $\sigma_{0,2}$ предложенным методом составляет 5,2 %, при этом с вероятностью 90 % наибольшая абсолютная ошибка определения $\sigma_{0,2}$ не превышает 10 %.

Описанная методика может быть использована для нахождения предела текучести и тех металлов, у которых образуется наплыв на краю отпечатка.

Следует отметить, что на величину $\sigma_{0,2}$, определяемую по формуле (8), не влияет масштабный эффект, приводящий к снижению предела текучести при увеличении площади поперечного сечения образца. Для учета указанного эффекта можно использовать зависимости, приведенные в работе [16]. Необходимость учета размерного эффекта при определении механических свойств обоснована также в работе [17].

Таким образом, разработанный метод определения условного предела текучести можно рекомендовать для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 1497–84 Метод испытаний на растяжение. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
- Давиденков Н. Н., Беляев С. Е., Марковец М. П. Получение основных механических характеристик стали с помощью измерений твердости / Заводская лаборатория. 1945. Т. 11. № 10. С. 964 – 973.
- Ишлинский А. Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля / Прикладная математика и механика. 1944. Т. 8. Вып. 3. С. 201 – 223.
- Пашков П. О. Пластичность и разрушение металлов. — Л.: Судпромгиз, 1950. — 259 с.
- Беленький Л. М., Русаков А. В., Элькин А. И. Исследование связей твердости с механическими свойствами / Проблемы прочности. 1976. № 10. С. 49 – 52.
- Пат. 2086947 Российская Федерация, МПК G01N3/00. Способ определения предела текучести материалов / Славский Ю. И., Матлин М. М.; Заявитель и патентообладатель Волгоградский политехн. институт. — № 93018860; заявл. 12.04.93; опубл. 10.08.98. Бюл. № 22.
- Славский Ю. И., Матлин М. М. К определению предела текучести металла по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. Т. 61. № 4. С. 53 – 58.
- Матлин М. М. Определение параметров первоначально точечного упругопластического контакта по физико-механическим свойствам контактирующих тел / Проблемы машиностроения и автоматизации. 1993. № 5. С. 11 – 20.
- Марковец М. П. Определение механических свойств металла по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
- Матюнин В. М. Определение предела текучести стали по характеристикам твердости / Заводская лаборатория. 1986. Т. 52. № 3. С. 77 – 78.
- Tamman G., Muller W. / Zeitschrift fur Metallkunde. 1936. Bd. 28. № 3.
- Гликман Л. А., Максимов Н. Определение предела текучести методом твердости / Заводская лаборатория. 1945. Т. 11. № 11 – 12. С. 1091 – 1094.
- Пат. 2079832 Российская Федерация, МПК 01 N 3/42. Способ определения предела текучести материалов / Федоров А. В., Дудкина Н. Г., Полозенко Н. Ю.; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. — № 95109400; заявл. 06.06.95; опубл. 20.05.97. Бюл. № 14.
- Григорович В. К. Унификация измерения твердости и микротвердости / Вестник машиностроения. 1985. № 1. С. 20 – 23.
- Славский Ю. И., Матлин М. М. Определение твердости по глубине внедрения конического индентора / Заводская лаборатория. 1991. Т. 57. № 10. С. 43 – 45.
- Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
- Матюнин В. М. Размерный эффект и его влияние на механические свойства материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 64 – 68.