

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ВДАВЛИВАНИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

МАРКОВЕЦ М. П., МАТЮНИН В. М., СЕМИН А. М.

На основе решения осесимметричной задачи пластичности о вдавливании шара в идеально пластическое тело [1] дано теоретическое и экспериментальное обоснование связи между напряжениями при растяжении и вдавливании для упрочняющихся материалов с учетом и без учета трения. Выполнен расчет и построены графики распределения нормальных напряжений по поверхности отпечатка. Определены коэффициенты, связывающие напряжения при растяжении и вдавливании при разных степенях деформации и углах вдавливания. Показано, что для упрочняющихся материалов в пределах равномерной деформации связь между напряжениями при растяжении и вдавливании подчиняется одинаковой закономерности независимо от смазки и степени деформации.

В [1] на основе решения осесимметричной задачи пластичности для идеально пластической среды определено значение коэффициента s , связывающего предел текучести S_T с твердостью по Бринеллю HB . Этот коэффициент получен для $d/D = 0,376$ (отношения диаметра отпечатка d к диаметру шара D) без учета упрочнения и трения и равен 0,383:

$$S_T = 0,383 HB \quad (1)$$

В публикуемой работе по методике А. Ю. Ишлинского с использованием упрощений, предложенных в [2], были рассчитаны значения коэффициента s для широкого интервала отношений d/D без учета и с учетом упрочнения и трения. Не рассматривая решение осесимметричной задачи, подробно изложенное в [1-3], рассмотрим ее заключительную часть, в которой дается анализ распределения нормальных напряжений по контактной поверхности и расчет по ним коэффициента s .

В публикуемой работе приведены данные экспериментов по определению коэффициента s в зависимости от уровня прочности материала, смазки контактных поверхностей и степени пластической деформации поверхностного слоя отпечатка. Расчеты коэффициента трения f , необходимые для расчета s , производились по следующей формуле [4]:

$$f = M/Pd \quad (2)$$

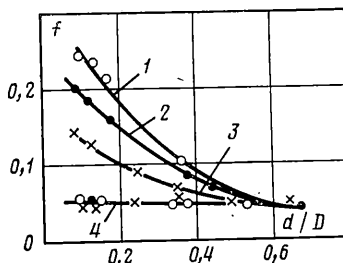
где M — крутящий момент срагивания, P — нагрузка на шар.

Полученные значения f изменялись от 0,03 до 0,25. На фиг. 1 представлена зависимость коэффициента трения f от отношения d/D для сплава ХН78Т (светлые точки), армо-железа (темные точки), стали ЭП99 (крестики) без смазки (линий 1-3) и со смазкой (линия 4). Проведенные исследования дали возможность обоснованно выбрать коэффициенты трения и рассчитать нормальные напряжения σ_n для различных углов вдавливания шара по методике, изложенной в [2, 3]. В качестве примера на фиг. 2 приводится распределение нормальных напряжений по поверхности отпечатка для отношений $d/D = 0,09$ (фиг. 2, а) и $d/D = 0,376$ (фиг. 2, б) при различных коэффициентах трения (1 — $f=0$; 2 — $f=0,05$; 3 — $f=0,15$). Нормальные напряжения на фиг. 2 приведены в виде отношения σ_n/K , где K — пластическая постоянная, представляющая максимальное касательное напряжение, при достижении которого начинаются первые пластические деформации независимо от вида напряженного состояния. Из фиг. 2 следует, что распределение нормальных напряжений по контактной поверхности неравномерное с постепенными увеличениями от периферии к центру. Максимальное значение σ_n/K наблюдается в центре отпечатка, если не учитывать трение между шаром и испытуемым материалом ($f=0$). При учете трения максимум смещается от центра отпечатка, причем, чем выше коэффициент трения, тем больше проявляется неравномерность распределения σ_n/K . При большом отношении d/D (фиг. 2, б) максимальное напряжение в центре отпечатка наблюдается также и при малых коэффициентах трения.

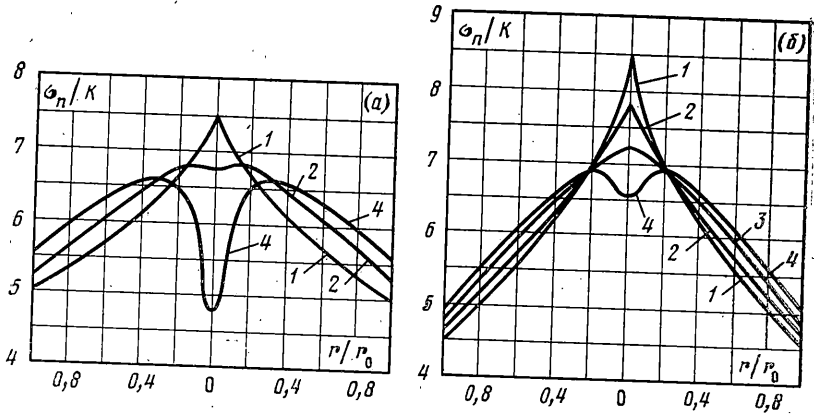
Как известно, среднее напряжение при вдавливании шара по способу Бринелля определяется по формуле

$$HB = P/F \quad (3)$$

где F — площадь поверхности отпечатка.



Фиг. 1



Фиг. 2

В связи с неравномерным распределением σ_n по контактной поверхности P можно определить при помощи криволинейного интеграла

$$P = 2\pi \int_0^{r_0} |\sigma_n| r dr \quad (4)$$

Заменяв приближенно интегрирование суммированием, можно записать

$$P = 2\pi \Sigma |\sigma_n| r \Delta r \quad (5)$$

Площадь поверхности отпечатка F равна

$$F = 2\pi R (R - \sqrt{R^2 - r_0^2}) \quad (6)$$

Тогда формула (3) с учетом формул (5) и (6) примет вид

$$HB = \Sigma |\sigma_n| r \Delta r / R (R - \sqrt{R^2 - r_0^2}) \quad (7)$$

Коэффициент c для неупрочняющегося материала можно найти из формул (4) и (7), заменив S_T величиной $2K$:

$$c = 2KR (R - \sqrt{R^2 - r_0^2}) / \Sigma |\sigma_n| r \Delta r \quad (8)$$

где R и r_0 — радиусы шара и отпечатка, r — текущий радиус отпечатка.

В табл. 1 представлены значения коэффициента c без учета упрочнения для различных d/D при разном коэффициенте трения f . В скобках приведены коэффициенты

Таблица 1

d/D	$f=0$	$f=0,05$	$f=0,1$	$f=0,15$
0,09	0,356 (0,358)	0,344	0,335	0,329 (0,331)
0,14	0,361	0,349	0,339	0,334
0,376	0,386 (0,383)	0,374	0,364	0,358
0,68	0,456	0,441	0,430	0,422

енты c , полученные А. Ю. Ишлинским для $d/D=0,376$ и А. Л. Геллером [3] для $d/D=0,09$ без учета трения, которые практически совпали с коэффициентами, полученными в публикуемой работе также при $f=0$.

При определении c в [1] был применен прием, который исключал искривление поверхности тела вокруг шара, имеющее место при пластической деформации. Этот прием предусматривал вдавливание шара в предварительно подготовленную лунку, имеющую форму шара, до появления первых пластических деформаций (т. е. примерно до предела текучести). Полученный таким образом коэффициент c устанавливает связь между пределом текучести и твердостью для идеально пластического материала, деформирующегося без упрочнения. Однако применяемые на практике материалы, как правило, деформируются с упрочнением и задача о внедрении шара в упрочняющийся материал решается сложно. Учесть упрочнение можно следующим способом, используя результаты работы [1]. В данной работе коэффициент c получен для отношения $d/D=0,376$, которому для упрочняющегося материала будет со-

ответствовать величина средней деформации в лунке, близкая к равномерной деформации при растяжении [5]. Таким образом, если вдавливание производить в реальный материал без предварительно подготовленной лунки до достижения $d/D=0,376$, то уровень средних контактных напряжений будет соответствовать истинному временному сопротивлению разрыву S_b и равномерной деформации при растяжении. Учитывая $S_b = \sigma_b / (1 - \Psi_p)$ и формулу (1), можно получить

$$\sigma_b = 0,383(1 - \Psi_p) HB \quad (9)$$

где σ_b — временное сопротивление разрыву, Ψ_p — предельное равномерное относительное сужение.

Как следует из табл. 1, с ростом отношения d/D возрастает коэффициент c . Поскольку величина твердости, оцениваемая по способу Бринелля, зависит от отношения d/D , а условное напряжение при растяжении σ — от остаточной деформации Ψ , то при переменных d/D и Ψ в пределах равномерной деформации уравнение (9) примет вид

$$\sigma = c(1 - \Psi) HB_I = a HB_I \quad (10)$$

где $a = c(1 - \Psi)$ — коэффициент для упрочняющегося материала, HB_I — величина напряжения при вдавливании, оцениваемая по способу Бринелля и соответствующая заданному d/D .

Таблица 2

d/D	$f=0$	$f=0,05$	$f=0,1$	$f=0,15$
0,09	0,355	0,343	0,334	0,328
0,14	0,357	0,346	0,336	0,331
0,376	0,358	0,347	0,338	0,332
0,68	0,334	0,324	0,316	0,310

Таким образом, коэффициент a устанавливает связь для упрочняющихся материалов между условными напряжениями при растяжении и средними напряжениями при вдавливании, оцениваемыми по способу Бринелля. Однако, как показали расчеты, выполненные в работе, коэффициент a для упрочняющихся материалов с учетом трения изменяется незначительно с увеличением d/D . Больше влияние на a оказывает коэффициент трения f . Но если исключить из рассмотрения данные для $f=0$, то, как следует из табл. 2, коэффициент a имеет практически постоянное значение, близкое к $1/3$ независимо от степени деформации и трения. При большом значении $d/D=0,68$ наблюдается некоторое снижение коэффициента a . Но если учесть, что в этом случае коэффициент трения находится на уровне 0,05 независимо от степени смазки (фиг. 1), то и здесь коэффициент a приближается к $1/3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишлинский А. Ю. Осесимметрическая задача пластичности и проба Бринелля. — ПММ, 1944, т. 8, вып. 3, с. 201—224.
2. Тылевич Л. Н. Определение механических свойств судостроительных материалов методом вдавливания. — Тр. Центр. н.-и. ин-та технологии судостроения. Л.: 1959, вып. 23, с. 3—94.
3. Геллер А. Л. Аналитическое исследование связи между пределом текучести и твердостью, определяемой по параметрам малого отпечатка шарика. — Тр. Донничермет. Донецк, 1971, вып. 26, с. 209—213.
4. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 221 с.
5. Марковец М. П. Определение механических свойств металла по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.V.1984