УДК 620.178.6

С.Я. Березин
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
г. Чита, Россия
E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru
Дата поступления 21.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ РЕЗЬБОВЫДАВЛИВАНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические положения и результаты экспериментальных исследований контактных напряжений пластического деформирования методом вдавливания остроугольного конического индентора. На основе аналогии с методом вдавливания шарового индентора получена формула для расчета степени пластической деформации при внедрении конуса. Определены основные факторы, влияющие на пластические свойства деформируемых материалов в условиях процессов резьбовыдавливания. Установлены эмпирические зависимости показателей пластических свойств в форме контактных напряжений и пределов текучести от температуры, скорости и степени деформации для основных типов цветных сплавов.

Ключевые слова: резьба, резьбообразование, степень деформации, индентор, контактные напряжения, температура, скорость деформации, глубина вдавливания, твердость материала, конус, шар, пирамида, Бринелль Майер, Шор, Роквелл, цветные сплавы, микротвердость, пластическая твердость.

Введение

Процесс получения резьб пластическим деформированием сопровождается значительными усилиями и крутящими моментами. Для технологического обеспечения таких процессов необходимо иметь данные о контактных напряжениях, возникающих на рабочих поверхностях резьбообразующего инструмента. Контактное напряжение $\sigma_к$ как расчетный параметр пластических свойств входит в аналитические зависимости силовых показателей процессов обработки резьб давлением. Резьбообразование происходит при разных условиях, сопровождающихся температурой, скоростями, усилиями, степенями деформации. В данной работе рассматривается методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований показателей пластичности наиболее распространенных цветных сплавов, в деталях из которых реализуются процессы резьбовыдавливания.

Основная часть

К показателям пластичности металлов можно отнести твердость, предел текучести и сопротивление пластической деформации. С их помощью можно оценивать такие параметры процесса резьбовыдавливания как радиальные усилия, крутящие моменты, остаточные деформации и т.д.

Сопротивление пластической деформации или контактные напряжения, возникающие на деформирующих гранях резьбообразующего инструмента, зависят от прочностных характеристик материала, степени, скорости и температуры деформации [1,2]. Степень деформации определяется схемой формообразования и исследуется применительно к реальным процессам, например, в прокатке [3], резьбовыдавливании [1,4], растяжении, осадке, волочении [2,5] и т.д.

Величины контактных напряжений и степеней деформации в процессах резьбовыдавливания установить достаточно трудоёмко. В основном используется методика оценки глубины упрочнённой зоны путем измерения микротвердости поверхности

шлифов разрезных образцов [1,4]. Задачей исследований является нахождение простого и удобного способа определения контактных напряжений для условий, соответствующих процессам резьбовыдавливания, т.е. степеней деформации до 0,42 – 0,45, небольших скоростей течения металла – до 50 мм/с, и темератур 20 – 200 °С.

Известные методы определения прочностных характеристик в основном основаны на внерении различных инденторов в поверхность образцов. Используются сферические, конические и пирамидные формы наконечников инденторов. При этом углы при вершине конических и пирамидных наконечником в основном находятся в пределах 120^O – 142^O. Все эти методы можно разделить на три группы:

- методы микроиндентирования;
- испытания материалов на твердость;
- определение сопротивления материалов пластической деформации.

Первая группа методов применяется для исследования микротвердости поверхностных слоёв материала [6,7], установления упруго-пластических деформаций [12,13], исследования свойств тонких покрытий [10].

Ко второй группе относятся известные методы испытаний на твердость по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу, Майеру, Шору и др., а также испытания на пластическую твердость [3,11,12].

В обеих группах используются сферические и угловые инденторы, вызывающие образование под ними зон несвободного течения металла в форме так называемого «гидростатического ядра» (по определению X.Xernot) [9]. Такие инденторы могут не вполне адекватно оценить условия, в котором находится металл в зонах резьбовыдавливания, т.к. углы деформирующих граней инструмента вполне острые и не превышают 60^O.

Третья группа методов ориентирована именно на оценку уровня контактных напряжений (сопротивление пластической деформации) [13,14,15,16].

Во многих работах устанавливается определенная связь контактных напряжений с показателями твердости материала [11,13]. Например, в работе [13] величина контактных напряжений пластической деформации устанавливалась в зависимости от показателя твердости материала по Бринеллю по упрощенным зависимостям типа:

$$\sigma_K = (1{,}17–1{,}32)HB, \ [\text{кг/см}^2], \quad \sigma_K = (11{,}46–12{,}94)HB, \ [\text{МПа}]. \qquad (1)$$

Для оценки пластических свойств материалов М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин рекомендуют величину пластической твердости *НД*, которая также связана с величиной *НВ* и получена на основе испытаний материала методом оценки отпечатка от вдавливания шарика [17]:

$$HB = 1{,}96 \cdot НД^{0{,}89}, \quad [\text{МПа}]. \qquad (2)$$

где *НД* – величина пластической твердости.

Значение *НД* достаточно близки величине σ_K, определенной по формулам (1).

Однако, в реальных процессах пластического деформирования на материал влияют такие факторы как температура в зоне формообразования, скорость деформации и ее степень. Поэтому задачей настоящих исследований было, используя метод вдавливания конического индентора, определить форму более универсальных зависимостей вида:

$$\sigma_K = f(HB, T, V, \psi) \qquad (3)$$

где Т – температура в деформируемой зоне;

V, ψ – скорость и степень деформации соответственно.

Исследования проводились по методике и с применением оборудования, которые были представлены в работе [14]. Испытуемые образцы устанавливались на специальное приспособление, имеющее внедряемый конический индентор с углом при вершине 80°, усилие на который передавалось от штока пресса через тензометрический динамометр. Одновременно контролировались усилие, глубина внедрения и температура образца.

Предварительно, для получения экспериментальных зависимостей такого типа следовало установить ряд соотношений, а именно:

1. По глубине *t* и времени *τ* вдавливания конусного индентора определить среднюю скорость деформации:

$$V_\tau = \frac{t}{\tau \cdot \cos\alpha}, \quad \text{мм/с}.$$

2. По глубине вдавливания рассчитать боковую поверхность контакта S и степень деформации ψ, которые определялись на основе геометрических параметров процесса внедрения конуса в материал образца и представленных на рисунке 1:

$$\begin{cases} S = \pi \cdot OB \cdot AB = \pi \cdot \left(t + h\right)^2 \cdot tg\alpha; \\ \psi = V / V_P, \end{cases} \quad (4)$$

где: h – высота выдавленного металла в виде кольцевого пояска вокруг индентора;

V – объем внедренной части конуса;

V_P – некоторый расчетный объем внедрения, относительно которого степень, определяемая по 2-ой формуле системы (4), будет соразмерна степеням деформации, соответствующим процессам выдавливания метрических резьб ψ = 0,4–0,45.

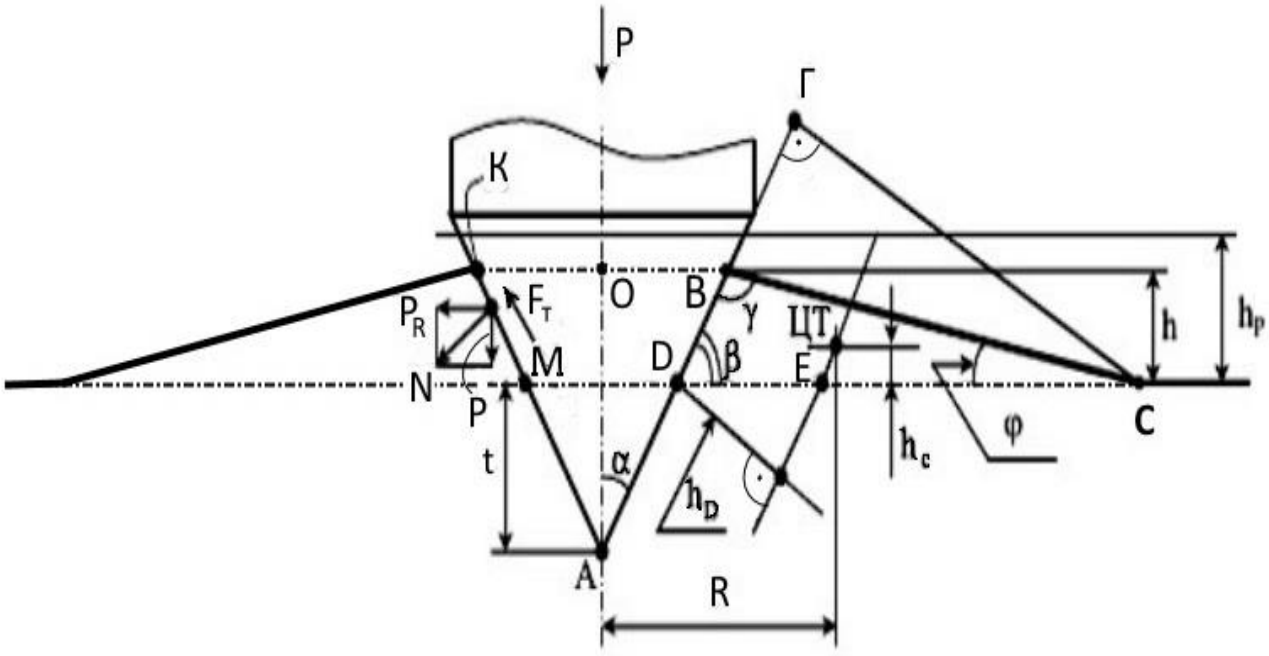

Рисунок 1. Схема процесса вдавливания конусного индентора в поверхность материала образца

Таким образом, глубина внедрения будет являться комплексным расчетным показателем при условии, если определено теоретическое соотношение между ней и высотой h подъема кольцевого наплыва (первая формула системы (4)).

Контактные напряжения, в соответствии с рис. 1, определяются в конце вдавливания из условия:

$$\sigma_K = \frac{P}{S \cdot \left(\sin\alpha + f \cdot \cos\alpha\right)}, \quad \text{при } t = t_K, \quad (5)$$

где: P – усилие вдавливания конуса;

S – площадь контакта по боковой поверхности конуса;

α – половина угла конуса при вершине;

f – коэффициент трения в контакте,

t, t_K – текущая и конечная глубина вдавливания.

При вдавливании конуса на глубину t образуется кольцевой наплыв с сечением в виде треугольника DBC. Очевидно, что объем вдавленной части конуса AMD будет равен объему кольцевого наплыва:

$$V^K_{AMD} = V^H_{DBC}. \quad (6)$$

Из системы (4) определим площадь боковой контактной поверхности конуса с

учетом высоты наплыва h. Полный угол конуса при вершине для измерительной установки был принят равным $2\cdot\alpha$=60°.

Объем конуса, внедренный от начальной поверхности равен:

$$V_{AMD}^{K} = \frac{1}{3}\cdot\pi\cdot t^3\cdot tg^2\alpha = 0{,}348\cdot t^3. \quad (7)$$

Объем кольцевого наплыва можно рассчитать, используя теорему Паппа:

$$V_{DBC}^{H} = \frac{DC\cdot h}{2}\cdot 2\pi\cdot R = \\ = \pi\cdot DC\cdot h\cdot R, \quad (8)$$

где DC – длина основания треугольника DBC;

R – радиус вращения центра тяжести (ЦТ) треугольника DBC вокруг оси конуса.

Для определения DC необходимо установить значения углов φ и γ треугольника DBC. Выразим через высоту подъема h стороны DC и BC, а далее, по теореме синусов найдем соотношения углов φ и γ:

$$BC = \frac{h}{\sin\varphi}; \qquad \frac{DC}{\sin\gamma} = \frac{BC}{\sin\beta};$$

$$DC = h\cdot\left(\frac{1}{tg\beta} + \frac{1}{tg\varphi}\right);$$

При $\beta=\pi/2-\alpha$=60° соотношение сторон DC и BC приводит к формуле:

$$\sin\gamma = 0{,}5\sin\varphi + 0{,}866\cos\varphi,$$

которая справедлива при значении углов γ=102°49′ и φ=17°11′.

Для решения равенства (6) находим сторону DC и радиус R по следующей цепочке вычислений:

$$\begin{cases} DC = h\cdot\dfrac{\sin\gamma}{\cos\alpha\cdot\sin\varphi}; \\ DB = \dfrac{h}{\cos\alpha}; \\ BC = t + \dfrac{h}{\cos\alpha}; \end{cases} \quad (9)$$

$П=DC+DB+$BC – периметр треугольника.

$$\begin{cases} R = (t + h_C)\cdot tg\alpha + DE; \\ h_C = \dfrac{h}{2}\cdot\dfrac{DB+BC}{n} = 0{,}5\cdot h\cdot\dfrac{t+2h}{t+5{,}389h}; \\ DE = \dfrac{h_D}{\cos\alpha}; \\ h_D = \dfrac{\partial D}{2}\cdot\dfrac{DC+BC}{n} = \dfrac{DC}{2}\cdot\sin\beta\cdot\dfrac{DC+BC}{n}. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя значения углов α, β, γ, φ в системы (9,10), находим значения деформируемых объемов (7,8). Приравняв объемы и решая равенство (6) относительно t и h, после преобразований, получаем его окончательный вид:

$$h^4 + 0{,}062h^3t^2 - 0{,}0103ht^3 - \\ -0{,}00192t^4 = 0 \quad (11)$$

При средней глубине внедрения конуса 2 мм, для решения уравнения (11) применим метод подстановки соотношений. Он позволяет получить равенство (12), удовлетворяющее условию (11):

$$h = 0{,}206t, \quad (12)$$

с учетом чего, формула площади боковой поверхности примет окончательный вид $S = 2{,}63t^2$.

Расчет степени деформации при вдавливании конуса связан с решением задачи определения расчетной глубины t_P, от которой можно производить отсчет степени деформации. Для этого сравним процесс вдавливания шарика диаметром 10 мм (определение твердости по Бринеллю) с анализируемым процессом.

Степень деформации при вдавливании шара можно определить как отношение объема вдавленной части шара V_C к половине его полного объема $V_{Ш}$:

$$\psi = \frac{V_C}{V_{Ш}} = 4\cdot\frac{t^2\cdot(3/2\cdot D - t)}{D^3}, \quad (13)$$

где D – диаметр шара.

Объем внедренной части конуса с учетом высоты подъема металла h равен:

$$V\partial = \frac{1}{12}\cdot\pi\cdot D_O^2\cdot(t+h) = 0{,}193\cdot\pi\cdot t^3,$$

где D_O – диаметр основания по линии BK (см. рисунок 1).

Степень деформации для конического индентора можно определить в виде:

$$\psi = \frac{t^3}{t_P^3}, \qquad (14)$$

где t, t_P – текущая и расчетная глубина внедрения, соответствующая объемам V и V_P. (система 5) .

Подставив в формулу (14) среднюю степень деформации для метрических резьб ψ=0,43, получим выражение для расчета t_P:

$$t_P = t \cdot \sqrt[3]{\psi^{-1}} = 1{,}325t.$$

Подставив значение t_P из последней формулы в формулу (14) и приравняв (13) и (14), получим следующее выражение:

$$6t^2D - 4t^3 = 0{,}43D^3. \qquad (15)$$

Введем обозначение $K = \frac{D}{t}$ и приведем выражение (15) к кубической форме:

$$K^3 - 14{,}02K + 9{,}346 = 0. \qquad (16)$$

Уравнение (16) имеет отрицательный дискриминант и три действительных корня:

$K_1 = -4{,}04$; $K_2 = 3{,}35$; $K_3 = 0{,}69$.

Какой из двух положительных корней взять за расчетный, покажет характер кривых степеней деформации, изображенных на рисунке 2.

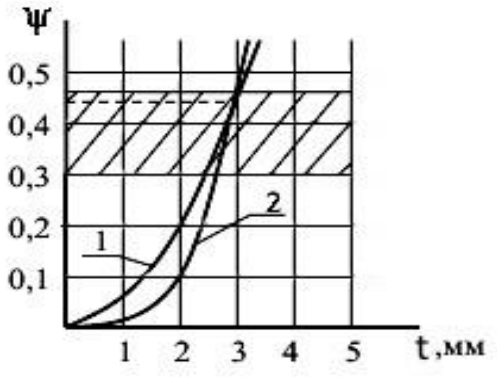

Рисунок 2. Расчетные кривые степеней деформации: 1 – шар; 2 – конус

Кривая 1, соответствующая вдавливанию шарика диаметром 10 мм получена путем расчета степеней деформации по формуле (13). Для построения кривой 2 использовали формулу (14). Обе кривые пересекаются в точке (t=2.985 мм; ψ=0.429). Это соответствует значению корня K_2. Заметим, что пересечение кривых, находится в области, соответствующей степеням деформации при выдавливании метрических резьб (заштрихована на рисунке 2). Таким образом, предельное значение расчетной глубины вдавливания конуса будет соответствовать величине:

$$t_P = 1{,}325K_2 = 3{,}955\,мм$$

Округлив его до 4 мм, окончательно получены расчетные формулы для проведения экспериментов:

$$\begin{cases} \sigma_K = P/\left(2{,}637 \cdot t^2\right); \\ V_\tau = 1/\left(\tau \cdot \cos\alpha\right); \\ \psi = t^3/64, \end{cases} \qquad (17)$$

где τ – время вдавливания.

Эксперименты проводились на специальном приспособлении, представленном в работе [14].

Образцы изготовляли из алюминиевых и магниевых сплавов АЛ9, АЛ5,АК4, МЛ 5. Значения определяющих факторов в процессе исследований варьировались в следующих пределах:

$V\tau$=0,4–1,6 мм/с; t=2–3,5 мм;

T=20°–300°С; ψ=0,36–0,48.

В результате статистической обработки данных были получены экспериментальные формулы контактных напряжений в МПа, которые приведены в таблице 1. При подстановке в формулы значений скорости V необходимо учитывать, что это не окружная скорость завинчивания, а скорость внедрения деформирующей грани в металл. Она связана с геометрией заходного витка следующей зависимость:

$$V = V_O \cdot \sin\varphi \cdot \sin\psi \cdot 10^3, мм/с \qquad (18)$$

где V_0 – окружная скорость.

Значения контактных напряжений можно использовать как для теоретических расчетов силовых показателей процесса резьбообразования, подставляя их значения в формулы крутящих моментов, давлений и усилий, так и для оценки пластических свойств цветных сплавов при различных условиях деформирования.

Результаты исследования для сходных условий хорошо согласуются с результатами, полученными в других работах

[1,4]. Однако они более точны в силу одновременного учета трех параметров деформации – *V*, *T*, ψ.

В таблице 1 приведены экспериментальные зависимости контактных напряжений от исследуемых параметров, а на рисунке 3 геометрический образ одной из зависимостей для сплава АК 4 в факторном пространстве:

$$\begin{cases} V \Rightarrow [0 \cdots 0,45] \ мм/с; \\ \psi \Rightarrow [0 \cdots 0,5]; \\ T = 20^0 C. \end{cases}$$

Как видим из рисунка 3, скорость и степень деформации оказывают значительное влияние на $\sigma_к$. С ростом температуры сплавов уровень контактных напряжений снижается. На это указывает знак «минус» в экспериментальных формулах. Исследования проводились при трех ступенях температур образцов: 20, 100 и 200 град. С. При повышении степени сопротивление деформации повышается, а при увеличении скорости, наоборот – падает. Влияние независимых факторов на $\sigma_к$ имеет в основном нелинейный характер и во всем диапазоне факторного пространства разброс значений $\sigma_к$ весьма широк. В соответствии с рисунком 3 для сплава АК 4 он составляет от 570 МПа до 930 МПа.

Таблица 1

Результаты обработки экспериментов по исследованию контактных напряжений для 4-х марок сплавов

Сплав	Твердость *НВ, МПа*	Плотность γ, $г/см^3$	Экспериментальные формулы для расчета контактных напряжений $\sigma_к$, *МПа*
АК 4	109-117	2,8	$\sigma_K = 842,9 - 0,45T + 77,7\psi + 527,8\psi^2 - 886,1V + 1092,6V^2$
АЛ 9	60-70	2,66	$\sigma_K = 633,7 - 0,34T + 58,5\psi + 396,8\psi^2 - 666,2V + 821,5V^2$
АЛ 4	45-70	2,65	$\sigma_K = 460,6 - 0,24T + 42,5\psi + 288,4\psi^2 - 484,2V + 597,1V^2$
МЛ 5	24-28	1,8	$\sigma_K = 296,8 - 0,16T + 27,4\psi + 185,8\psi^2 - 312,0V + 384,7V^2$

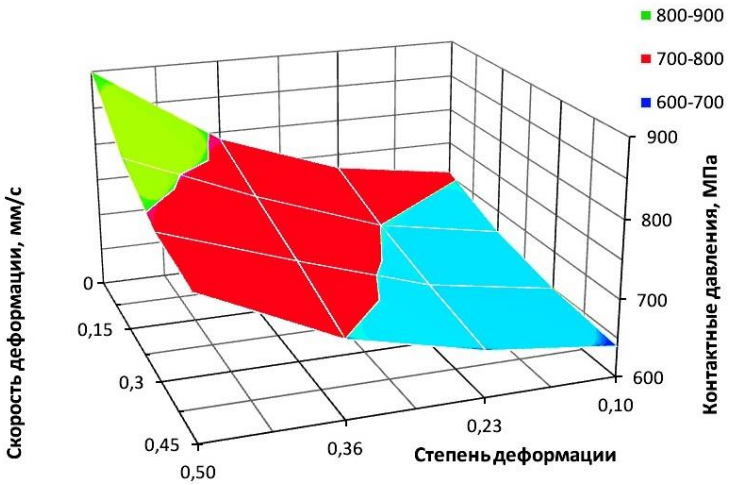

Рисунок 3. Поверхность отклика, соответствующая экспериментальной формуле для сплава АК 4 при нормальной температуре деформации

На основе полученных данных можно установить и другие показатели пластических свойств конструкционных материалов, например, пределов текучести σ_T. Для исходного состояния материалов, т.е. при нормальной температуре, минимальных степенях деформации и скоростях, для всех 4-х марок исследуемых сплавов можно рекомендовать более простые формулы определения пластических свойств:

$$\begin{cases} \sigma_K = 7,93HB + 25,47\gamma; \\ \sigma_T = 0,647HB + 48,38\gamma, \end{cases}$$

где γ – плотность материала (см. таблицу 1).

Заключение

В результате проведенных исследований можно констатировать следующее:

- разработана методика оценки пластических свойств материала путем вдавливания конического индентора с углом при вершине, обеспечивающим свободное течение металла и который не приводит к появлению закрытых областей стеснённой деформации;
- на основе аналогии с процессом вдавливания шарового индентора установлена формула расчета степени деформации для предлагаемого конического индентора;
- получены экспериментальные зависимости для расчета контактных напряжений деформации и пределов текучести марок цветных сплавов, наиболее распространенных в промышленности. Установлен характер влияния физико-механических факторов на их уровень;
- данный метод исследования пластических свойств конструкционных материалов достаточно универсален и может быть распространен на малоуглеродистые стали и даже такие хрупкие материалы как серые чугуны, которые, как показывает опыт, могут выдерживать в малых объемах степени деформации до 0,45.

Библиографический список

1. Получение резьб выдавливающими метчиками / С. И. Велицкий, С. И. Кузурман // Обзоры по межотраслевой тематике Гос. НИИ науч. и техн. информации № 2/41-70. – М.: ГосИНТИ, 1970. - 37 с.
2. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. - М.: Металлургия, 1972. 408 с.
3. Зависимости твердости металлов от степени пластической деформации при различных способах деформирования / В.И.Болобов, В.С.Бочков, С.А.Чупин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 6. Том 81. С. 52 – 56.
4. Лапин В.В. Контактные напряжения и усилия деформации при прокатке профиля винтовых деталей // Сб. ст. Труды ЛПИ. Серия «Обработка металлов давлением». - 1967. № 287. С. 37 - 46.
5. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. - М.: Металлургия. - 1978. - 360 с.
6. Sivaram S., Sutharsan K., Jayasinghe J.A., Bandara C.S. Razrabotka sposoba ispytaniya na vdavlivanie dlya ozcenki mehanicheskih svojstv stalnoj armatury [Development of indentation testing metod for evaluation of mechanical properties of steel reinforcement] Injenernoe stroitelstvo i upravlenie stroitelstvom. Materialy 8-i mezhdunarodnoy konferentsii. [8 th International Conference on Structural Engineering and Construction Management. ICSECM2017-105 Sri Lanca, 2017]. Pp.85-93.
7. Broitman E. Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview //Tribology Letters. Springer. (2017). P.18. doi: 10.1007/s11249-016-0805-5.
8. Celentano D., Guelorget B., Francois M. Numerical simulation and experimental validation of the microindentation test applied to bulk elastoplastic materials // Modelling Simulation in Materials Science and Engineering, № 20 (2012)

045007 (32pp). doi:10.1088/0965-0393/20/4/045007.
9. Hernot X., Bartie O. Rasshiryaushchayasya model polosti, vkliuchaiushchaya v sebya pronikaiushchiy I svaynyy effekty [An expanding cavity model incorporating pile-up and sink-in effects]. Zhurnal «Issledovanie materialov». Materialy nauchnogo obshchestva [Journal of Materials Research, Materials Research Society]. № 27(1). January, 2012, pp.132-140.
10. Tunvisut K., O'Dowd N.P., Busso E.P. Ispolzovanie funktsiy masshtabirovaniya dlya opredeleniya mekhanicheskikh svoistv tonkikh pokrytiy iz testov mikrovdavlivaniya [Use of scaling functions to determine mechanical properties of thin coatings from microindentation tests]. Mezhdunarodnyi zhurnal tverdykh tel i konstrukzhyi [International Journal of Solids and Structures], № 38, 2001, pp. 335-351.
11. Кузьменко А.Г. Исследование метода индентирования поверхности шаром с определением новых механических характеристик металла // Проблеми трибології (Problems of Tribology). Хмельницкий нац. ун-т. Украина. 2011, № 1(59). С.100-114.
12. Пат. 2488806 Российская Федерация, МПК G01N3/42. Способ определения пластической твердости материала образца / М.М.Матлин, А.И.Мозгунова, С.Л.Лебский, Е.Н.Казанкина, В.А.Казанкин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ). № 2012106818/28; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.07.2013.
13. Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х. Мишнаевский Л.Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. - Киев: Техника, 1974. 162 с.
14. Березин С.Я. Исследование контактных напряжений при резьбообразовании методом вдавливания конического индентора // Технология металлов. 2003. №9. С. 28-31.
15. Семичевский Г.А., Березин С.Я. Технология сборки гладко-резьбовых соединений: Монография. - Чита: ЗабГПУ им. Н.Г Чернышевского. 1998. 100 с.
16. Смирнов С.В., Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора // Кузнечно-штамповочное производство, 2000, №8. С. 3 – 6.
17. Дрозд М.С., Матлин М.Н., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. - М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

Information about the paper in English

S.Ya. Berezin
Transbaikal State University
Chita, Russia
E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru
Received 21.05.2019

UNDERSTANDING THE PLASTIC PROPERTIES OF NON-FERROUS ALLOYS IN THREAD FORMING

Abstract

This paper considers the theory and the results of an experimental study of contact stresses occurring during plastic deformation by sharp conical indentation. Using the analogy of ball indentation, the authors came up with a formula for calculating the degree of plastic deformation in the case of conical indentation. The key factors were identified that impact the plastic properties of deformed material during thread forming. Empirical relationships were established that show how contact stresses and yield stresses are governed by the temperature, rate and degree of deformation in application to the main types of non-ferrous alloys.

Keywords: threads, thread forming, degree of deformation, indenter, contact stresses, temperature, rate of deformation, indentation depth, strength of material, cone, ball, pyramid, Brinell Meyer, Shore, Rockwell, non-ferrous alloys, microhardness, plastic hardness