

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ЭКСПЕРИМЕНТ

MATHEMATICAL MODELS. EXPERIMENT

УДК 621.88.002.72

DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-49-57

*Сергей Яковлевич Березин,
доктор технических наук, профессор,
Забайкальский государственный университет
(673039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),
e-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru*

Исследование пластических свойств цветных сплавов в условиях резьбовыдавливания

В статье рассмотрены теоретические положения и экспериментальные исследования контактных напряжений пластического деформирования методом вдавливания конического индентора. Получены эмпирические зависимости показателей пластических свойств в форме контактных напряжений и пределов текучести от температуры, скорости и степени деформации для основных типов цветных сплавов. Для определения степени деформации при вдавливании конуса применен метод аналогии с процессом вдавливания шарового индентора. Установлена коррелирующая взаимосвязь контактных напряжений с параметрами твердости материала по Бринеллю и удельного веса. На основании эмпирических зависимостей определен характер влияния независимых факторов на уровень контактных напряжений.

Ключевые слова: резьба, степень деформации, индентор, контактные напряжения, твердость материала, Бринелль, пластическая твердость

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. Напряжение σ_K как расчётный параметр входит в аналитические зависимости силовых показателей процессов. Резьбообразование происходит при разных условиях, сопровождающихся температурой, скоростями, усилиями, степенями деформации. Возникающие при резьбовыдавливании силовые показатели определяются напряжённым состоянием в области деформирующего витка и контактными напряжениями на деформирующих участках инструмента. Во многих работах устанавливается определённая связь контактных напряжений с показателями твердости материала [1; 2].

Большое количество методик и формул для определения контактных напряжений σ_K не решает одной важной задачи. Она заключается в том, что для расчётов усилий и моментов резьбовывадавливания необходимы универсальные и удобные формулы, позволяющие оценить контактные напряжения с учётом таких факторов, как твёрдость в исходном состоянии, температура в зоне контакта, степень и скорость деформации.

Универсальным методом определения σ_K является метод вдавливания шаровых и конических инденторов [1–3]. Например, в работе [2] величина контактных напряжений пластической деформации устанавливалась в зависимости от показателя твёрдости материала по Бринеллю для упрощённых зависимостей типа

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

Для оценки пластических свойств материалов М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин рекомендуют величину пластической твёрдости HD , которая также связана с величиной HB и получена на основе испытаний материала методом оценки отпечатка от вдавливания шарика [3]

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

где HD — величина пластической твёрдости.

Значения HD достаточно близки величине σ_K , определённой по формулам (1).

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

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

где T — температура в деформируемой зоне; V, ψ — скорость и степень деформации соответственно.

Исследования проводились по методике и с применением оборудования, которые были представлены в работе [4]. Испытуемые образцы устанавливались на специальное приспособление, имеющее внедряемый конический индентор, на который усилие передавалось от штока прессы 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

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

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, представленных на рис. 1.

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

где h – высота выдавленного металла в виде кольцевого пояска вокруг индентора; V – объём внедрённой части конуса; V_P – некоторый расчётный объём внедрения, относительно которого степень, определяемая по 2-й формуле системы (4), будет соразмерна степеням деформации, соответствующим процессам выдавливания метрических резб $\psi=0,4-0,45$.

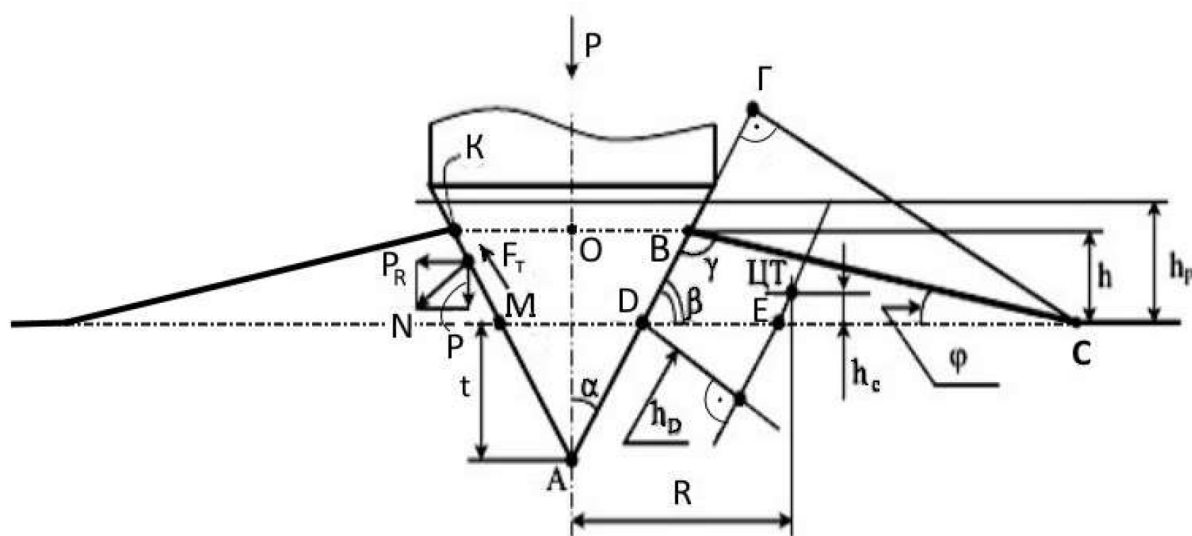


Рис. 1. Схема процесса вдавливания конусного индентора в поверхность материала образца

Fig. 1. Diagram of the process of indentation of a conical indenter into the surface of the sample material

Таким образом, глубина внедрения будет являться комплексным расчётным показателем при условии, если определено теоретическое соотношение между ней и высотой h подъёма кольцевого напльва (первая формула системы (4)). Контактные напряжения, в соответствии с рис. 1, определяются в конце вдавливания из условия:

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

где P – усилие вдавливания конуса; S – площадь контакта по боковой поверхности конуса; α – половина угла конуса при вершине; f – коэффициент трения в контакте; t и t_K – текущая и конечная глубина вдавливания.

При вдавливании конуса на глубину t образуется кольцевой напльв с сечением в виде треугольника DBC . Очевидно, что объём вдавленной части конуса AMD будет равен объёму кольцевого напльва

$$V_{AMD}^K = V_{DBC}^H \quad (6)$$

Из системы (4) определим площадь боковой контактной поверхности конуса с учётом высоты наплыва h . Полный угол конуса при вершине для измерительной установки был принят равным $2 \cdot \alpha = 60^\circ$.

Объём конуса, внедрённого от начальной поверхности, равен

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

Объём кольцевого наплыва можно рассчитать, используя теорему Паппа

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

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 подъёма h стороны DC и BC , а далее по теореме синусов найдём соотношения углов φ и γ :

$$BC = \frac{h}{\sin \varphi}; \quad \frac{DC}{\sin \gamma} = \frac{BC}{\sin \beta}; \quad DC = h \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \right).$$

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

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

которая справедлива при значении углов $\gamma = 102^\circ 49'$ и $\varphi = 17^\circ 11'$.

В равенстве (6) находим сторону DC и радиус R по следующей цепочке вычислений:

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

$\Pi = DC + DB + BC$ – периметр треугольника,

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

Подставляя значения углов $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ в системы (9), (10), находим значения деформируемых объёмов (7), (8). Приравняв объёмы и решая уравнение (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 учётом чего формула площади боковой поверхности примет окончательный вид $S = 2,63t^3$.

Расчёт степени деформации при вдавливании конуса связан с решением задачи определения расчётной глубины t_P . Для этого сравним процесс вдавливания шарика диаметром 10 мм (определение твёрдости по Бринеллю) с анализируемым процессом.

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

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

где D – диаметр шара.

Объём внедрённой части конуса с учётом высоты подъёма металла h равен:

$$V_0 = \frac{1}{12}\pi D_O^2(t + h) = 0,193\pi t^3,$$

где D_O – диаметр основания по линии ВК (рис. 1).

Степень деформации для конического индентора можно определить в виде

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

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

Подставив в формулу (14) среднюю степень деформации для метрических резёв $\psi = 0,43$, получим выражение для расчёта t_P

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

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

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

Введём обозначение $K = D/t$ и приведём выражение (15) к кубической форме:

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

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

$$K_1 = -4,04; \quad K_2 = 3,35; \quad K_3 = 0,69.$$

Какой из двух положительных корней взять за расчётный, покажет характер кривых степеней деформации, изображённых на рис. 2.

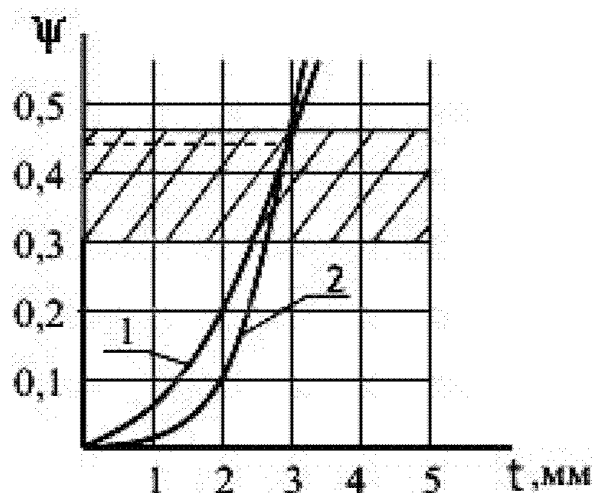


Рис. 2. Расчётные кривые степеней деформации: 1 – шар; 2 – конус

Fig. 2. Calculated curves for the degree of deformation: 1 – ball; 2 – cone

Кривая 1, соответствующая вдавливанию шарика диаметром 10 мм, получена путём расчёта степеней деформации по формуле (13). Для построения кривой 2 использовали формулу (14). Обе кривые пересекаются в точке ($t=2,985$ мм; $\psi=0,429$). Это соответствует значению корня K_2 . Заметим, что пересечение кривых находится в области, соответствующей степеням деформации при выдавливании метрических резьб (заштрихована на рис. 2).

Таким образом, предельное значение расчётной глубины вдавливания конуса будет соответствовать величине

$$t_p = 1,325K_2 = 3,955\text{мм}.$$

Округлив его до 4 мм, окончательно получим расчётные формулы для проведения экспериментов

$$\begin{cases} \sigma_K = \frac{P}{2,637t^2}; \\ V_\tau = \frac{1}{\tau \cos \alpha}; \\ \psi = \frac{t^3}{64}. \end{cases} \quad (17)$$

Их проводили на специальном приспособлении, представленном в работе [4]. Образцы изготавливали из алюминиевых и магниевых сплавов АЛ9, АЛ5, АК4, МЛ5.

Значения определяющих факторов в процессе исследований варьировались в следующих пределах:

$$V_{\tau} = 0,4 - 1,6 \text{ мм/с}; \quad t = 2 - 3,5 \text{ мм}; \quad T = 20^{\circ} - 300^{\circ} \text{C}; \quad \psi = 0,36 - 0,48.$$

В результате статистической обработки данных были получены экспериментальные формулы контактных напряжений в МПа, которые приведены в таблице. 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 зависимостью

$$V = 10^3 V_0 \sin \varphi \sin \psi \text{ мм/с}, \quad (18)$$

где V_0 – окружная скорость.

Значения контактных напряжений можно использовать как для теоретических расчётов силовых показателей процесса резбообразования, 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; 3]. Однако они более точны в силу одновременного учёта трёх параметров деформации V, T, ψ .

В таблице приведены экспериментальные зависимости контактных напряжений от исследуемых параметров, а на рис. 3 дан геометрический образ одной из зависимостей для сплава АК4 в факторном пространстве:

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

Таблица

Результаты обработки экспериментов по исследованию контактных напряжений для 4 марок сплавов

Сплав	Твёрдость HV , МПа	Плотность γ , г/см ³	Экспериментальные формулы для расчёта контактных напряжений σ_k , МПа
АК4	109–117	2,8	$\sigma_K = 842,9 - 0,45T + 77,7\psi + 527,8\psi^2 - 886,1V + 1092,6V^2$
АЛ9	60–70	2,66	$\sigma_K = 633,7 - 0,34T + 58,5\psi + 396,8\psi^2 - 666,2V + 8215V^2$
АЛ4	45–70	2,65	$\sigma_K = 460,6 - 0,24T + 42,5\psi + 288,4\psi^2 - 487,2V + 597,1V^2$
МЛ5	24–28	1,8	$\sigma_K = 296,8 - 0,16T + 27,4\psi + 185,8\psi^2 - 312,0V + 384,7V^2$

Как видим из рис. 3, скорость и степень деформации оказывают значительное влияние на σ_k . С ростом температуры сплавов уровень контактных напряжений снижается. На это указывает знак «минус» в экспериментальных формулах. Исследования проводились при трёх ступенях температур образцов: 20, 100 и 200 °С. При

повышении степени сопротивление деформации повышается, а при увеличении скорости, наоборот – падает. Влияние независимых факторов на σ_k имеет в основном нелинейный характер и во всём диапазоне факторного пространства разброс значений σ_k весьма широк. В соответствии с рис. 3 для сплава АК4 он составляет от 570 МПа до 930 МПа.

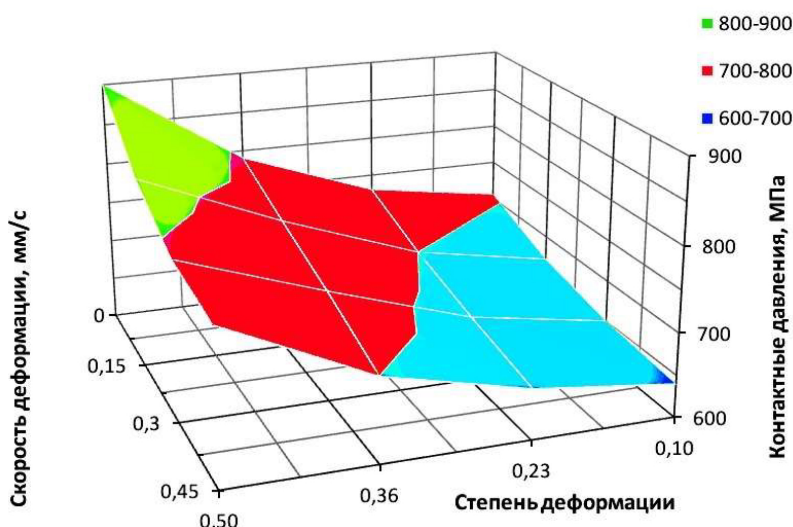


Рис. 3. Поверхность отклика, соответствующая экспериментальной формуле для сплава АК4 при нормальной температуре деформации

Fig. 3. The response surface corresponding to the experimental formula for AK4 alloy at normal deformation temperature

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 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, показанная в таблице.

Данный метод исследования пластических свойств конструкционных материалов достаточно универсален и применялся для малоуглеродистых сталей и даже таких хрупких материалов, как серые чугуны, которые, как показывает опыт, могут выдерживать в малых объёмах деформации, степени до 0,45.

Список литературы

1. Кузьменко А. Г. Исследование метода индентирования поверхности шаром с определением новых механических характеристик металла // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). 2011. № 1. С. 100–114.
2. Сагарда А. А., Чеповецкий И. Х., Мишнаевский Л. Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. Киев: Техника, 1974. 162 с.

3. Дрозд М. С., Матлин М. Н., Сидякин Ю. И. Инженерные расчёты упругопластической деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

4. Березин С. Я. Исследование контактных напряжений при резьбообразовании методом вдавливания конического индентора // Технология металлов. 2003. № 9. С. 28–31.

Статья поступила в редакцию 03.05.2019; принята к публикации 30.05.2019

Библиографическое описание статьи

Березин С. Я. Исследование пластических свойств цветных сплавов в условиях резьбовываивания // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 14, № 3. С. 49–57. DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-49-57.

Sergey Ya. Berezin,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,

Transbaikal State University

(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),

e-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

The Study of the Plastic Properties of Non-Ferrous Alloys in Relation to the Self-Tapping Processes

The article deals with the theoretical provisions and experimental studies of contact stresses of plastic deformation by pressing a conical indenter. Empirical dependences of indicators of plastic properties in the form of contact stresses and yield stress on temperature, speed and degree of deformation for the main types of non-ferrous alloys are obtained. The method of analogy with the process of ball indenter indentation is used to determine the degree of deformation during cone indentation. The correlation of contact stresses with the Brinell hardness and relative weight parameters of the material is established. The nature of the influence of independent factors on the level of contact stresses is determined on the basis of empirical dependences.

Keywords: thread, degree of deformation, indenter, contact stresses, material hardness, Brinell, plastic hardness

References

1. Kuz'menko A. G. Issledovanie metoda indentirovaniya poverhnosti sharom s opredeleniem novyh mekhanicheskikh harakteristik metalla // Problemi tribologii (Problems of Tribology). 2011. № 1. S. 100–114.

2. Sagarda A. A., Шеровецкий И. Н. Mishnaevskij L. L. Almazno-abrazivnaya obrabotka detalej mashin. Kiev: Tekhnika, 1974. 162 s.

3. Drozd M. S., Matlin M. N., Sidyakin Yu. I. Inzhenernye raschyoty uprugoplasticheskoy deformacii. M.: Mashinostroenie, 1986. 224 s.

4. Berezin S. Ya. Issledovanie kontaktnyh napryazhenij pri rez'boobrazovanii metodom vдавливания конического индентора // Tekhnologiya metallov. 2003. № 9.

Received: May 03, 2019; accepted for publication May 30, 2019

Reference to article

Berezin S. Ya. The Study of the Plastic Properties of Non-Ferrous Alloys in Relation to the Self-Tapping Processes // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2019. Vol. 14, No 3. PP. 49–57. DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-49-57.