

УДК 621.9

О.А. РОЗЕНБЕРГ, Ю.А. ЦЕХАНОВ

О НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В ПРОЦЕССАХ ХОЛОДНОГО СТУПЕНЧАТОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Начиная с 1964 г. в ИСМ НАН Украины начаты широкие комплексные экспериментальные исследования закономерностей механики ступенчатого холодного пластического деформирования металлов. В частности, исследовался процесс многоциклового деформирующего протягивания [1,2]. С его помощью оказалось возможным достаточно просто и точно варьировать всеми основными параметрами процесса холодного ступенчатого пластического деформирования: числом циклов деформирования; средним контактным давлением; длиной пути трения; величиной гидростатического давления в зоне контакта; накопленной деформацией и степенью деформационного упрочнения и др. Новые возможности как для технологического развития этой обработки, так и для научного изучения фундаментальных физико-механических явлений пластического деформирования дало создание в ИСМ нового твердосплавного деформирующего инструмента. С 1970 эти исследования проводились совместно со школой технологической механики Воронежского политехнического института.

На основе комплексных экспериментально-теоретических исследований получены новые данные по различным физико-механическим явлениям в процессах холодного пластического деформирования. Наиболее интересными из полученных результатов по нашему мнению являются:

- явление повышения пластичности обрабатываемых заготовок с конечной толщиной стенки за счет увеличения степени дробности многоциклового холодного пластического деформирования [3,4]; для процесса многоциклового деформирующего протягивания на основе изучения закономерностей механики пластического деформирования заготовок изучено явление накопления микродефектов, приводящих к разрушению обрабатываемых заготовок; установлено, что наиболее интенсивно они накапливаются на свободной наружной поверхности заготовки; разработаны технологические рекомендации, позволяющие управлять этим процессом и обеспечивать качество обработки по параметру остаточной пластичности;
- при обработке существенно толстостенных заготовок на основе исследования механики контактного взаимодействия [4] установлено, что основное накопление повреждений в поверхностном деформируемом слое при многоциклового деформирующем протягивании происходит перед инструментом на свободной поверхности отверстия; на основе изученных закономерностей механики ППД разработаны практические рекомендации по обеспечению качества обработки по параметру пластичности поверхностного слоя технологическими методами.
- с помощью методов теории подобия и размерностей исследовано явление формирования микрорельефа поверхности, обрабатываемой холодным ступенчатым пластическим деформированием [5]; на основе анализа экспериментальных данных выявлен определяющий комплексный параметр процесса – работа сил контактного трения и получен безразмерный критерий подобия исследуемого явления, включающий в себя основные параметры процесса с точки зрения его механики; для проведения практических технологических расчетов данный критерий подобия выражен через технологические параметры процесса;

- наличие так называемых критических контактных давлений между инструментом и заготовкой, при которых площадь контактной поверхности становится минимальной, а также связь между этими критическими давлениями и предельными характеристиками упрочнения металла[1,2].

Рассмотрим подробнее указанные физико-механические явления.

1. Пластичность заготовок с конечной толщиной стенки при многоцикловом деформирующем протягивании

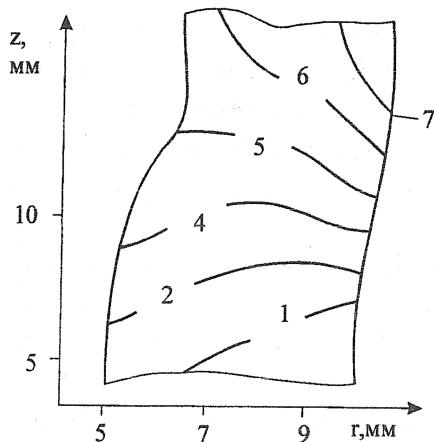


Рис. 1. Изолинии ресурса использованной пластичности $\Psi \times 10^2$ в трубной заготовке, обработанной одним циклом деформирующего протягивания

Исследование механики пластического деформирования заготовок с конечной толщиной стенки осуществлялось с помощью оригинальных методик метода ви-зиопластичности, основанных на использовании слоистых моделей. Для расшифровки полученных таким способом экспериментальных данных разработана оригинальная методика расчета кинематических параметров по слабдеформированным линиям тока. Рассчитывались компоненты тензора скоростей деформаций. Интегрированием дифференциальных уравнений равновесия от наружной, свободной от нагрузок поверхности заготовки, к внутренней получено распределение компонент тензора напряжений во всей деформируемой области. Затем интегрированием вдоль линий тока рассчитывался критерий ресурса использованной пластичности по Колмогорову, который и характеризует степень насыщения микродефектами материала заготовки из-за его пластического деформирования:

$$\Psi = \int_0^{\bar{e}_0} \frac{d\bar{e}_0}{e_{np}(\eta)}, \quad (1)$$

где $\bar{e}_0$ – накопленная деформация за весь сложный процесс пластического деформирования, $e_{np}(\eta)$ – предельная деформация материала при соответствующем значении коэффициента жесткости текущего напряженного состояния: $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_0}$, σ –

гидростатическое давление, σ_0 – интенсивность напряжений. На рис.1 в качестве примера показано распределение Ψ по объему заготовки, деформированной одним циклом деформирующего протягивания. Как видно, основное накопление повреждений происходит на свободной наружной поверхности изделия. Прямые эксперименты подтвердили правильность результатов теоретических исследований. Разрушение заготовок всегда начи-

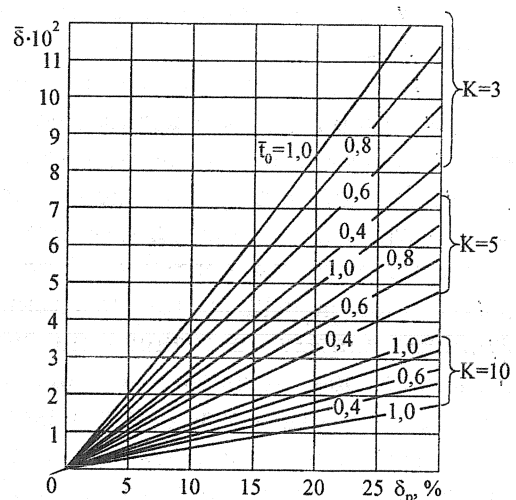


Рис.2. Номограмма для определения предельного относительного натяга $\bar{\delta} = 2\delta/d_0$ и предельного числа циклов деформирования K в зависимости от относительной толщины стенки заготовки $\bar{t}_0 = 2t_0/d_0$ и относительного удлинения материала заготовки при растяжении δ_p

нается с образования макротрещин на их наружной поверхности. Установлено, что увеличение числа циклов деформирования при сохранении постоянного суммарного натяга повышает пластичность заготовок. На основе теоретического анализа большого числа экспериментальных данных разработана расчетная модель определения Ψ в зависимости от технологических параметров процесса. На рис.2 представлена графическая интерпретация этой модели в виде номограммы, пригодной для практических технологических расчетов предельных параметров процесса, при которых начинается разрушение заготовки.

2. Пластичность обрабатываемой поверхности толстостенных заготовок

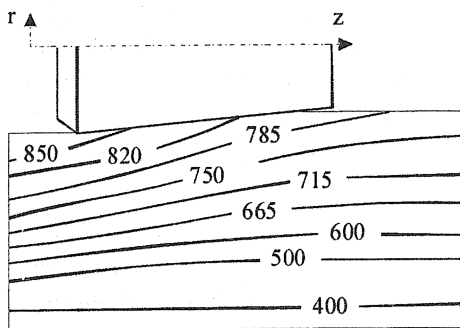


Рис.3. Распределение интенсивности напряжений σ_0 , МПа в зоне контакта после третьего цикла обработки заготовки из стали 45

Экспериментально установлено, что при деформирующем протягивании существенно толстостенных заготовок, когда отношение их наружного диаметра к внутреннему $D_0/d_0 \geq 2$, в контактной зоне в поверхностном слое возникает очаг локальных пластических деформаций, соответствующий условиям поверхностного пластического деформирования. Экспериментально, методом измерения твердости установлено, что уже после третьего цикла деформирования градиент деформационного упрочнения материала заготовки практически перпендикулярен к обрабатываемой поверхности. На рис.3 показано распределение интенсивности напряжений σ_0 в очаге деформирования. Как видно, с высокой степенью точности можно принять, что градиент упрочнения в осевом направлении

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0, \text{ где } k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} - \text{интенсивность касательных напряжений или пластическая постоянная материала заготовки.}$$

С учетом этого физического явления на основе теории неоднородного пластического тела разработана математическая модель напряженного состояния в контактной области и выявлены интересные закономерности в распределении контактных напряжений по поверхности инструмента. В частности установлено, что максимум контактных давлений находится в самом начале ширины контакта. С помощью этой модели и экспериментальных данных по деформированному состоянию, полученных с помощью оригинальных методик метода визиопластичности, исследовано накопление микродефектов в очаге локальных пластических деформаций с помощью определения критерия пластичности Колмогорова (1). Распределение приращения $\Delta\Psi$ за один цикл деформирования показано на рис.4. Как видно, основное накопление повреждений при пластическом деформировании происходит у самой обрабатываемой поверхности перед

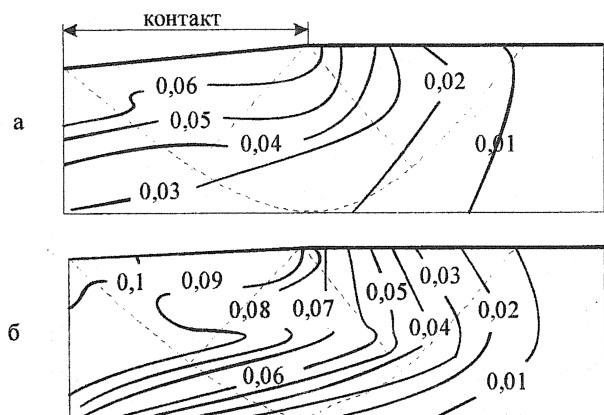


Рис.4. Изолинии приращения ресурса пластичности $\Delta\Psi$ поверхностного слоя заготовки из стали 45, после третьего цикла обработки инструментом с углом конусности γ : 5° – а, 10° – б

инструментом.

Экспериментально установлено, что деформирование материала заготовки перед инструментом за один цикл деформирующего протягивания происходит до величины накопленной деформации, примерно равной четверти от ее максимального значения на выходе из контакта:

$$\Delta \bar{\epsilon}_0 = 0,25 \Delta \bar{\epsilon}_0^{\max}. \quad (2)$$

На основе этих закономерностей разработана инженерная модель повреждаемости обрабатываемой поверхности, позволяющая рассчитывать Ψ при любом числе циклов деформирования:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Delta \Psi_i = N \frac{\Delta \bar{\epsilon}_0^{\max}}{0,25 \epsilon_{\text{пр}}(-1,73)}. \quad (3)$$

Для угла конусности инструмента $\gamma = 5^\circ$ величина $\Delta \bar{\epsilon}_0^{\max} \cong 0,24$, а для $\gamma = 10^\circ$ $\Delta \bar{\epsilon}_0^{\max} \cong 0,39$; предельная деформация $\epsilon_{\text{пр}}(-1,73)$ материала заготовки определяется экспериментально при сжатии в условиях плоской деформации. Условие начала разрушения имеет вид: $\Psi = 1$ (4).

3. Исследование закономерностей формирования микрорельефа обрабатываемой поверхности с помощью методов теории подобия и размерностей

Эксперименты и существующий теоретический анализ показывают, что форма микрорельефа поверхности изделия при обработке большим числом деформирующих элементов (более 3) зависит не только от “текущего” значения параметров контактного взаимодействия, но и от всей предыдущей истории процесса воздействия инструмента на поверхность заготовки. Процесс трения на контактной поверхности изделия с заготовкой является сложным физико-химическим явлением, описываемым многими параметрами. Поэтому теоретическое определение стандартных параметров шероховатости из-за сложности механических и физико-химических явлений на контактной поверхности в настоящее время является невозможным.

Опыт развития физики и механики показывает, что в тех случаях, когда удовлетворительное теоретическое решение сложной задачи невозможно, а экспериментальное изучение и описание явления требует проведения трудоемких многофакторных опытов, весьма эффективным оказывается применение методов теории подобия и размерностей. Они позволяют не только обобщить и “компактно” представить экспериментальные данные, но и значительно уменьшить их объем. Методы теории подобия и размерностей с успехом применялись и при решении ряда задач по технологической механике.

Однако применению этих методов должен предшествовать предварительный теоретический качественный анализ с целью выявления среди множества параметров так называемых *определяющих параметров*, которые по своей физической сущности оказывают главное влияние на характер протекания процесса.

Стабильность указанных факторов приводит к значительному сокращению числа *определяющих параметров* процесса деформирующего протягивания.

Один из таких параметров уже известен - это контактное напряжение на сминаемых микрогребешках σ_n , или соответствующее ему среднее контактное давление q .

Теория пластичности и прямой эксперимент показывают, что появление касательного контактного напряжения τ_n при пластическом сдавливании единичной микронеровности

ведет к уменьшению нормального контактного напряжения σ_n , а значит к увеличению площади контакта, т.е. к дополнительному смятию этого микровыступа, при этом совершается дополнительная работа смятия. Но для преодоления сил трения τ_n инструменту приходится совершать дополнительную работу трения – $A_{тр}$.

При скольжении инструмента относительно поверхности заготовки по всей контактной площади стохастически возникают “мостики схватывания” – микрзоны полного прилипания материала инструмента к материалу заготовки, в которых τ_n достигает предельного значения, т.е. пластической постоянной материала заготовки. Это явление через описанные выше два механизма вызывает дополнительное (к простому сдавливанию от q_{max}) уменьшение шероховатости. Для преодоления такого дополнительного сопротивления совершается дополнительная работа трения. Явление схватывания интенсифицирует и массоперенос с поверхности заготовки в процессе трения об инструмент, что также способствует ее выглаживанию.

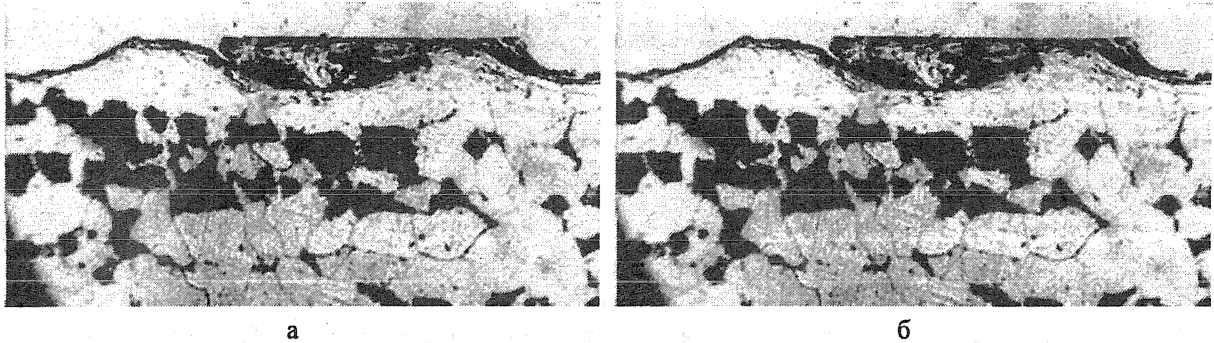


Рис. 5. Формирование микрорельефа поверхности заготовки из стали 45 после третьего (а) и пятого (б) циклов деформирования

На рис.5, а приведена фотография микропрофиля поверхности, полученной точением заготовки из стали 45, после третьего цикла деформирующего протягивания, а на рис.5, б – после прохождения пятого деформирующего элемента. На них хорошо видны два различных механизма его образования: сдавливанием и массопереносом. При большом числе циклов деформирования массо-перенос играет значительную роль. Причем его продукты (сверхдеформированный насыщенный микродефектами материал) даже заполняет впадины микровыступов.

Таким образом, анализ контактного взаимодействия инструмента с заготовкой позволяет выделить еще один доминирующий обобщающий фактор, непосредственно влияющий на процесс формирования микрорельефа обработанной поверхности, – работу сил трения $A_{тр}$. Полагаем, что текущее значение R_z зависит от исходной высоты шероховатости R_{zo} , от максимального за всю историю процесса контактного давления и от работы сил трения $A_{тр}$. Математически это определяется как

$$R_z = \varphi(R_{zo}; q_{max}; A_{тр}; \text{материал заготовки}).$$

Теоретическое исследование этого явления, выполненное с помощью методов теории подобия и размерностей позволило получить зависимость безразмерной шероховатости от безразмерного критерия подобия

$$\frac{R_z}{R_{z0}} = \varphi \left(\sum_{i=1}^N f_i \frac{q_i l_i}{\sigma_n d_0} \right), \quad (5)$$

в который входят все основные параметры процесса холодного ступенчатого деформирования за каждый i -й цикл деформирования: ширина контакта l_i ; коэффициент трения f_i ; экспериментально установлено, что контактное напряжение на поверхности сминаемого микрогребешка σ_n остается величиной постоянной и зависящей только от рода материала.

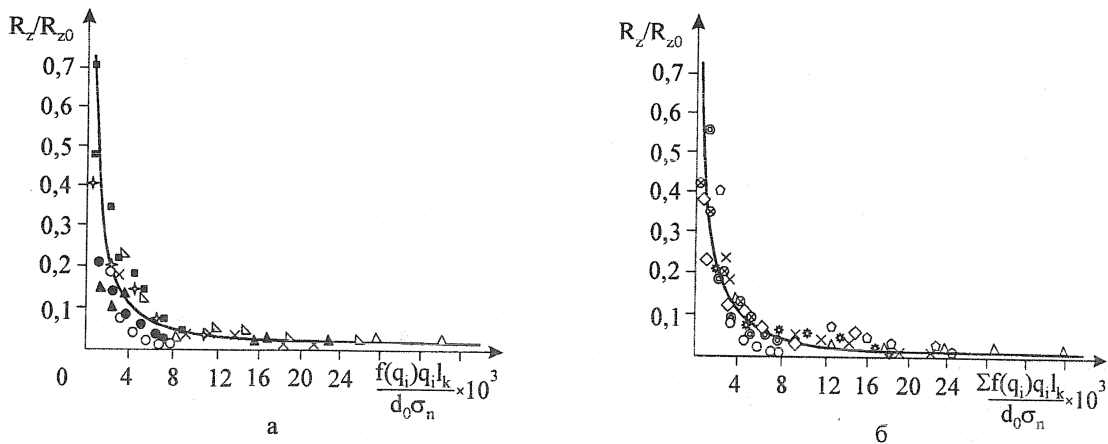


Рис.6. Зависимость относительной шероховатости обработанной поверхности от безразмерных параметров технологического процесса (угол конусности 5° , смазка – сульфифрезол, натяг – 0,2 мм на проход) при протягивании втулок из стали 10: инструментом из BK15; $\times$ - толщина стенки $t=3$ мм, $\circ$ - $t=1$ мм, Δ - $t=4,5$ мм; инструментом с покрытием из TiN: $\bullet$ - $t=1$ мм, $\blacktriangle$ - $t=3$ мм, инструментом с покрытием из CrN: $\blacksquare$ - $t=1$ мм; $\diamond$ - $t=3$ мм, $\blacktriangledown$ - $t=4,5$ мм; при протягивании втулок из стали 45: инструментом из BK15: $*$ - $t=3$ мм, $\circ$ - $t=1,8$ мм; при протягивании втулок из стали У8: инструментом из BK15: $\diamond$ - $t=1$ мм, $\circ$ - $t=4,5$ мм; при протягивании втулок из стали X18H10T: инструментом из BK15: $\circ$ - $t=10$ мм

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей были проведены многочисленные эксперименты по многоциклового деформирующему протягиванию втулок из сталей 10, 45, У8 инструментами из различных материалов: твердого сплава BK15, закаленной стали с покрытиями из TiN и CrN. Изменение контактного давления обеспечивалось изменением толщин стенок заготовок. Экспериментальные данные получали по методикам [1]. Все полученные экспериментальные данные были обработаны в соответствии с зависимостью (5) Их безразмерные комбинации представлены на рис.6. в координатах

$\frac{R_a}{R_{a0}} - \xi$, где через ξ обозначен предложенный критерий подобия $\xi = \frac{\sum f(q_i) q_i l_i}{d_0 \sigma_n}$. Гра-

фики безразмерных функций на рис.6, а отражают данные эксперимента при деформирующем протягивании заготовок из стали 10 инструментом из BK15 при различных технологических режимах.

Кривая, представленная на рис.6, б, соответствует экспериментам по обработке втулок из разных материалов (стали 10, 45, У8, X18H10T) твердосплавным инструментом без покрытия и стальным с покрытиями TiN и CrN.

Как видно из приведенного материала, выдвинутые теоретические положения удовлетворительно подтверждаются экспериментальными данными.

4. Влияние критического контактного давления на механику деформирующего протягивания

Значение контактных давлений необходимо для расчета на прочность деформирующих элементов инструмента, определения температуры в зоне контакта инструмента с изделием, выбора технологических смазок, оценки несущей способности обработанной поверхности детали и правильного построения технологического процесса.

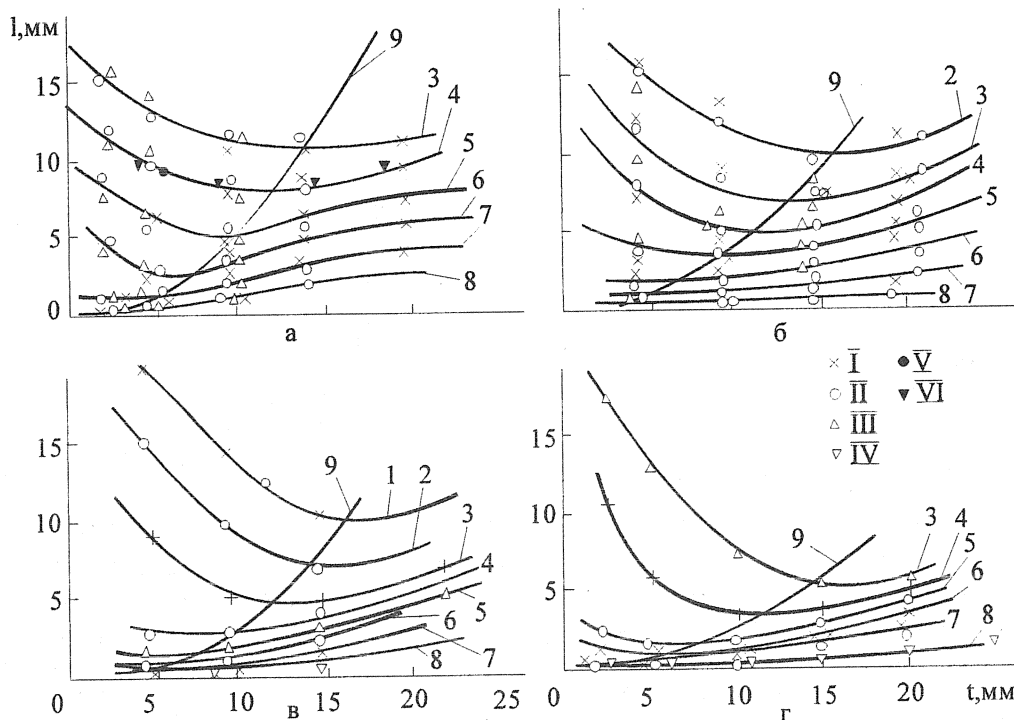


Рис.7. Зависимость ширины контакта от толщины стенки втулки и натяга при обработке втулок с диаметрами отверстий 36,5 (а), 66,0 (б), 106,0 (в) и 150,0 (г) деформирующими элементами с $\alpha = 4^\circ$ и $a = 3,5$ (1); 3,0 (2); 2,5 (3); 2,0 (4); 1,5 (5); 1,0 (6); 1,0 (7) и 0,25 мм (8): $\times$ – сталь 10, НВ 95...110; $\circ$ – сталь 45, НВ 170...210; $\triangle$ – сталь 38ХМЮА, НВ 265...270; ∇ – сплав АК6, НВ 60...65; ∇ – сплав ВТ9, НВ 320...330; $\bullet$ – свинец, НВ 45

Обратимся к анализу экспериментальных кривых ширины контакта (рис. 7). С увеличением толщины стенки, начиная с наименьшей, ширина контакта уменьшается. Это обусловлено влиянием кривой изгиба стенки в зоне внеконтактной деформации перед деформирующим элементом. Далее с увеличением толщины стенки ширина контакта, достигнув минимума, начинает возрастать.

Причиной увеличения ширины контакта является быстрое возрастание силы протягивания при увеличении толщины стенки и постоянном натяге, что в совокупности с уменьшением ширины контакта приводит к интенсивному увеличению контактных давлений, величина которых при малых толщинах стенки и больших натягах значительно ниже предела текучести обрабатываемого материала и не может вызвать пластических деформаций в зоне контакта. Однако, быстро повышаясь с увеличением толщины стенки, контактные давления достигают значений, превышающих в несколько раз предел текучести металла, и на каком-то уровне своей величины должны вызвать пластическое течение металла в зоне контакта, что выразится в увеличении его ширины. Зона минимума шири-

ны контакта является зоной такого уровня контактных давлений и, как видно из рис. 6, соответствует тем меньшим толщинам стенок, чем меньше натяг на деформирующий элемент, что логически увязывается с положением, согласно которому контактные давления возрастают при постоянной толщине стенки с уменьшением натяга. Для сохранения примерно одинакового уровня контактных давлений при малых натягах требуются меньшие толщины стенок. Нами показано, что диаметр обрабатываемого отверстия, толщина стенки изделия, натяг и минимум ширины контакта связаны относительно однозначно. На рис. 6 эта связь выражается кривыми 9, соединяющими точки минимумов ширины контакта. Уравнения этих кривых, выведенные для стали 45, имеют простую форму

$$t = 17,00a^{0,77} \cdot d_0^{-0,242}; \quad (6)$$

$$l = 103a^{1,61} \cdot d_0^{-1,012}. \quad (7)$$

Эти уравнения описывают режимы (t , a , d), определяющие постоянное контактное давление, причем такую его величину, при которой имеет место минимальная для постоянных натяга и диаметра ширина контакта и возникает течение металла по поверхности контакта, что приводит к возрастанию ширины последнего.

Если от этих критических режимов идти в направлении увеличения контактного давления, то ширина контакта будет возрастать. Эта тенденция имеет место, например, при увеличении толщины стенки (при $a = \text{const}$), когда наблюдается быстрое возрастание ширины контакта после ее минимального значения.

Нами было показано, что уменьшение натяга на деформирующий элемент приводит к повышению контактного давления, поэтому в критических режимах при постоянном контактном давлении уменьшение натяга приводит к уменьшению толщины стенки, что в свою очередь определяет соответствующее расположение кривых критических режимов, восходящее от малых толщин стенки и натягов к большим их значениям.

Можно заметить, что при значительном увеличении толщины стенки и малом диаметре отверстия (рис. 7) увеличение ширины контакта замедляется и кривые становятся более пологими. Это явление объясняется тем, что толщина стенки приближается к так называемой бесконечной ($t_0/d_0 = 1,0$), а при бесконечной толщине стенки ее дальнейшее увеличение не вызывает роста силы протягивания Q и контактных давлений, поэтому ширина контакта должна быть постоянной.

Поскольку закономерности изменения ширины контакта, представленные на рис. 7, не зависят от обрабатываемого металла, его механических характеристик, упрочнения, технологической смазки, логично предположить, что кривые критических режимов должны быть общими для всех обрабатываемых металлов и для всех металлов давать постоянные контактные давления, вызывающие появление течения металла и увеличение ширины контакта. Конечно, для каждого металла это критическое контактное давление будет иметь свою величину. Это предположение проверяли следующим образом.

При исследованиях было обнаружено, что критическое среднее контактное давление, приводящее к возникновению уширения контакта при деформирующем протягивании втулок из стали 45, равно интенсивности напряжения S_k , т.е. истинному напряжению в шейке разорванного растяжением образца из этого металла.

Поскольку этот интересный факт явился новым, ранее неизвестным и требовал проверки, были изготовлены образцы для растяжения из металлов, имеющих различные механические характеристики. Образцы доводились растяжением до разрушения и для них определялись истинные напряжения S_k , составляющие для АК6, 0,65 НВ – 0,35 ГПа; АК6, 1,20 НВ – 0,52; стали 10, 1,10 НВ – 0,83; стали 20, 1,25 НВ – 0,80; стали 45, 2,0 НВ – 0,87;

стали 20Х, 1,60 НВ – 0,99; В93, 1,56 НВ – 0,60; ТВМ, 2,25 НВ – 1,32; 30ХМЮА, 3,0 НВ – 1,30; 30ХГСА, 3,31 НВ – 1,54; НЭ–1, 1,03 НВ – 0,58 ГПа.

Как видим, значения S_k для разных металлов изменялись в широких пределах. Так, для АК6, 65 НВ $S_k = 0,35$ ГПа, а для стали 30ХГСА, 332 НВ $S_k = 1,54$ ГПа, т.е. истинное напряжение увеличивалось для различных металлов более, чем в 4 раза. По полученным значениям S_k , принимая их за критическое контактное давление q_{Nkp} , можно рассчитать толщины стенок t_{kp} , т.е. такие, которые соответствуют минимальным значениям ширины контакта.

Принимая $q_N = S_k$, получаем

$$t_{kp} = \left[\frac{\pi D_k l}{C_a (HB)} \cdot \frac{\sin(\alpha + \eta)}{\cos \eta} \cdot S_k \cdot \frac{1}{d_o^y a^{m-r}} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (8)$$

Подставляя в полученное выражение вместо l уравнение (7), находим

$$t_{kp} = \left[\frac{103 S_k \pi D_k a^{1,61-m+r}}{C_a (HB) d_o^{1,012+y}} \cdot \frac{\sin(\alpha + \eta)}{\cos \eta} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (9)$$

Значения C_a , x , y , m , r приведены в работе [1]. Угол трения η для каждого из обрабатываемых металлов и условий протягивания был подучен из специальных опытов. Значение S_k определялось растяжением до разрыва образцов.

Рассчитанные по уравнению (9) значения t_{kp} для трех натягов и двух диаметров приведены в таблице. Эти результаты показывают, что полученные для совершенно различных металлов значения t_{kp} отличаются от средних в большинстве случаев в пределах $\pm 10\%$. Несмотря на широкое разнообразие свойств и химических составов металлов, а также на различные применяемые технологические смазки (сплав АК6, 0,65 НВ, стали ТВМ, 10, 20, 45, 38ХМЮА протягивались с сульфозфрезолом; сплавы АК6, 1,2 НВ, В93, и сталь 30ХГСА – с жидкой смазкой АМГ-10; НЭ–1 – с твердой смазкой), критические значения толщин стенок получены с малым рассеиванием. Это рассеивание вполне естественно, так как при расчетах t_{kp} использовались экспериментально полученные величины C_a , η , S_k , x , y , m , r , значения которых не могут быть абсолютно точными.

Таблица

Значения t_{kp} , рассчитанные по уравнению (9).

do, мм	a, мм	Обрабатываемый материал										
		АК6, 0,65 НВ	АК6, 1,20 НВ	сталь 10, 1,10 НВ	сталь 20, 1,25 НВ	сталь 20Х, 1,60 НВ	сталь 45, 2,0 НВ	В93, 1,56 НВ	ТВМ, 2,25 НВ	30Х МЮ А 3,0 НВ	30ХГ СА, 3,31 НВ	НЭ–1, 1,03 НВ
36,5	0,5	4,5	4,00	4,6	4,50	4,60	3,75	4,65	3,77	4,03	4,20	4,90
	1,0	7,5	6,73	7,5	7,57	7,70	6,91	7,70	6,61	7,29	7,24	7,46
	2,0	12,4	11,37	12,2	12,70	13,10	12,72	12,75	11,60	13,17	12,50	11,32
	3,0	16,8	17,17	16,2	17,20	18,00	18,18	17,23	16,10	18,58	17,50	15,80
150	0,5	3,2	2,80	2,8	3,27	2,99	2,70	2,90	2,70	2,93	2,64	3,07
	1,0	5,2	4,70	4,7	5,47	5,00	4,88	4,80	4,60	5,11	4,56	4,62
	2,0	8,5	7,90	7,9	9,15	8,32	8,94	7,93	7,90	8,91	7,87	7,05
	3,0	11,3	10,75	10,1	12,40	11,33	12,80	10,72	10,90	12,58	11,02	9,01

Остановимся на вопросе влияния величины угла рабочего конуса α на критическое контактное давление. Все, что изложено выше, относится к углу рабочего конуса $\alpha = 4^\circ$. На рис. 7 кривая 9 представляет собой кривую постоянного контактного давления, равного величине S_k обрабатываемого металла. Эта кривая одна для всех обрабатываемых металлов, так как ширина контакта l не зависит от обрабатываемого металла. Не влияет на положение этой кривой и смазка, так как она не влияет на ширину контакта l . Так как кривая 9 связана с механической характеристикой обрабатываемого металла S_k , которой равно критическое контактное давление $q_{N_{кр}}$, вызывающее увеличение ширины контакта, так как $q_{N_{кр}}$ должно иметь одно значение для всех углов рабочего конуса деформирующего элемента, так как оно определяется только обрабатываемым металлом, то можно предположить, что и положение кривой 9 в координатах $t_0 - l$ не будет зависеть от угла рабочего конуса α . Это было проверено экспериментами, результаты которых представлены на рис. 8.

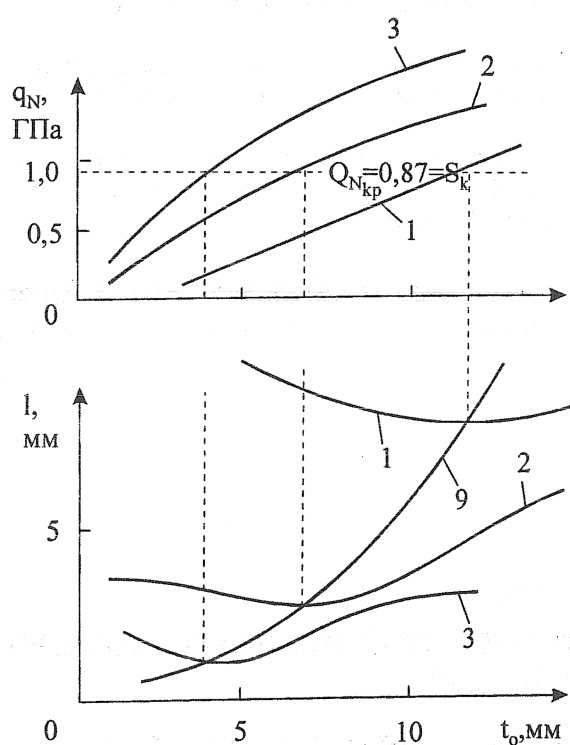


Рис. 8. Зависимость контактного давления и ширины контакта от толщины стенки и угла рабочего конуса

В координатах $t_0 - l$ расположена кривая, рассчитанная по уравнениям (6) и (7) для $\alpha = 4^\circ$; $d_0 = 35$ мм, $a = 2$ мм. В этих же координатах расположены экспериментально полученные кривые $l = l(t_0)$ для углов $\alpha = 4^\circ$, 7° и 12° (кривые 1, 2, 3). Точки пересечения этих кривых с кривой 9 соответствуют минимальным для каждой кривой значениям ширины контакта l , что уже подтверждает правильность нашего предположения. На этом же рисунке в верхней части расположены кривые контактных давлений для случаев протягивания втулок из стали 45 для тех же трех значений углов α . Для всех трех значений α получена одна и та же величина критического контактного давления $q_{N_{кр}} = 0,87$ ГПа = S_k .

Таким образом, можно сформулировать следующие положения.

1. Критические режимы (d , t , a , l) при деформирующем протягивании изделий с конечной толщиной стенки, определяемые уравнениями (6) и (7) являются общими для всех пластичных металлов.
2. Критическое контактное давление, вызывающее течение металла в зоне контакта, и увеличение ширины контакта для каждого из металлов имеет свою величину и постоянно независимо от диаметра отверстия, натяга и угла рабочего конуса α .
3. Критическое контактное давление равно истинному растягивающему напряжению в шейке разорванного образца из данного металла, измеренному в момент, предшествующий разрушению.

Установленные положения дали возможность объяснить картину немонотонного изменения ширины контакта в зависимости от толщины стенки детали, диаметра и натяга

при деформирующем протягивании изделий с конечной толщиной стенки, а равенство критического контактного давления истинному напряжению при разрыве дает основания предложить новый метод расчета силы протягивания.

Таким образом, проведенные комплексные исследования механики холодного ступенчатого деформирования позволяют не только решать практические задачи для конкретных технологических процессов механической обработки материалов, но и глубже понять физическую сущность сложных явлений, происходящих в пластически деформируемых металлах и их сплавах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Киев: Наукова думка, 1981. - 288 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990. - 320 с.
3. Цеханов Ю.А. Напряженное состояние при деформирующем протягивании толстостенной трубы // Известия вузов. Машиностроение, -1976. - № 5. - С. 153 - 156.
4. Цеханов Ю.А., Балаганская Е.А. Пластичность поверхностного слоя толстостенных трубных заготовок при деформирующем протягивании // Кузнечно-штамповочное производство. - 1997. - № 11 - С.4-6.
5. О влиянии технологических факторов процессов холодного пластического деформирования на шероховатость обработанной поверхности / Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская, О.А. Розенберг, С.Е. Шейкин: Сб. научн. тр. Киев: АТМ Украины, 1998. С.194 – 201.

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины
Воронежская государственная сельскохозяйственная академия

УДК 621.9.011

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Выполнен расчет параметров поверхностного слоя при обработке материалов резанием.

При изготовлении ответственных деталей изделий, работающих при высоких нагрузках и повышенных температурах, требуется выдерживать заданные параметры качества поверхностного слоя, в частности шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, остаточные напряжения. Решение данной задачи облегчается, если имеются обобщенные теоретические зависимости, устанавливающие взаимосвязь критериев качества поверхностного слоя с параметрами процесса резания. Это позволяет назначить режимы резания исходя из требуемой величины шероховатости, глубины наклепа, уровня остаточных напряжений.

Автором разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали применительно к обработке лезвийным инструментом (точение, растачивание, строгание), а также шлифованию. Остаточные напряжения, обусловленные структурными и фазовыми превращениями, не учитывались, что