

Доцент, кандидат технических наук В. Г. Кононенко

К ВОПРОСАМ ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Токарно-давилые работы, нашедшие широкое применение во многих отраслях техники, характеризуются низкой культурой производства и малой производительностью. Однако, по сравнению с другими видами производства оболочек, токарно-давилые работы благодаря целому ряду преимуществ не могли не привлечь внимания технологов. Нам ещё не известны какие-либо теоретические или экспериментальные исследования указанных процессов, не считая статей описательного характера. Такое состояние изучения токарно-давилых процессов тормозило их развитие.

Малые издержки на оборудование и инструмент, большая маневренность, хорошее качество продукции, возможность получения деталей сложной конфигурации, малые сроки подготовки производства, возможность комбинации этих работ с другими видами обработки листового металла, то есть высокая практическая ценность токарно-давилых процессов заставили автора заняться их изучением.

Целью настоящего исследования было:

- 1) определение главных факторов, влияющих на процесс выдавки;
- 2) изучение механизма деформирования металла;
- 3) определение зависимости между формоизменением металла и усилием деформирования;
- 4) значение фактора вращения в процессе выдавливания;
- 5) определение величины коэффициента выдавливания и факторов его определяющих;
- 6) определение путей механизации токарно-давилых работ.

1. Исследование процесса выдавливания было начато проведением тривиального эксперимента по изучению изменений формы координатной сетки, нанесенной на поверхность плоского кружка перед превращением его в цилиндр с толщиной стенок, равной толщине исходной заготовки.

Сетка состояла из концентрических окружностей, взаимно перпендикулярных касательных к окружностям и радиальных лучей. Было обнаружено, что после превращения кружка в цилиндрический стакан, ось которого перпендикулярна плоскости кружка и проходит через его центр, окружности на дне стакана остаются концентрическими, без изменения величин их радиусов.

Окружности, начальный радиус которых на кружке был больше радиуса дна стакана, также сохраняют свою форму, размещаясь в плоскостях, параллельных дну стакана. Расстояние между плоскостями не является величиной постоянной и увеличивается по мере приближения к открытому краю стакана и тем больше, чем выше стакан. Касательные к окружностям при этом принимают форму гиперболических кривых, а радиальные лучи, преломившись у днышка цилиндра, остаются прямыми, параллельными оси цилиндра (рис. 1).

Изменение начальной формы сетки свидетельствует о сжатии металла в процессе деформации в тангенциальном направлении и удлинении — в радиальном. Это изменение поддается аналитическому оформлению.

Аналогичная картина наблюдается при свёртывании листового материала. Одинаковое изменение формы сетки при свёртке и выдавке давало основание

предполагать, что процессы аналогичны.

II. С целью проверки существования предполагаемой аналогии и дальнейшего исследования процесса выдавки, как и в первоначальных исследованиях по глубокой вытяжке, экспериментально были определены величина и характер усилия выдавки и напряжения цилиндрической части выдавливаемой детали в функции пути инструмента.

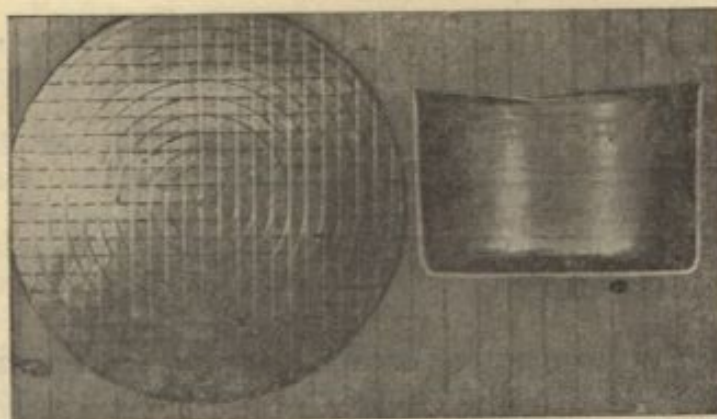


Рис. 1.

Были также изучены количественные изменения формы сетки выдавливаемых и свёртываемых деталей.

Экспериментальная установка

В качестве экспериментальной установки использовали токарный станок с ременным приводом от электромотора мощностью $N = 0,35$ кв и числом оборотов $n = 1440$ об/мин.

Суппорт станка заменён Т-образным суппортом, позволяющим удобство выдавки. Исследование производилось для двух скоростей шпинделя станка, наиболее часто используемых в производстве и заведомо обеспечивающих процесс выдавки: 720 об/мин и 1440 об/мин.

Инструментом для выдавки служил давилник, рабочий конец которого представлен в виде съёмного и полированного шара диаметром 20,5 мм, изготовленного из стали ХШ-15. Используемая оправка имела форму цилиндра и характеризовалась следующими размерами: диаметр оправки $2r_{\text{опр.}} = 50$ мм, радиус сопряжения доньшка с образующей оправки $r_c = 6$ мм, длина цилиндрической части $l_{\text{ц}} = 150$ мм. Крепление в кулачковом патроне станка осуществлялось при помощи её хвостовика. Поверхность оправки полирована. Материал оправки — сплав Д-1.

Прижим-токосъёмник выполнен в виде втулки из плексигласа с внутренней расточкой под подшипник вращающегося центра, закреплённого в шпинделе задней бабки станка. Он имел двойное назначение: удерживать заготовку

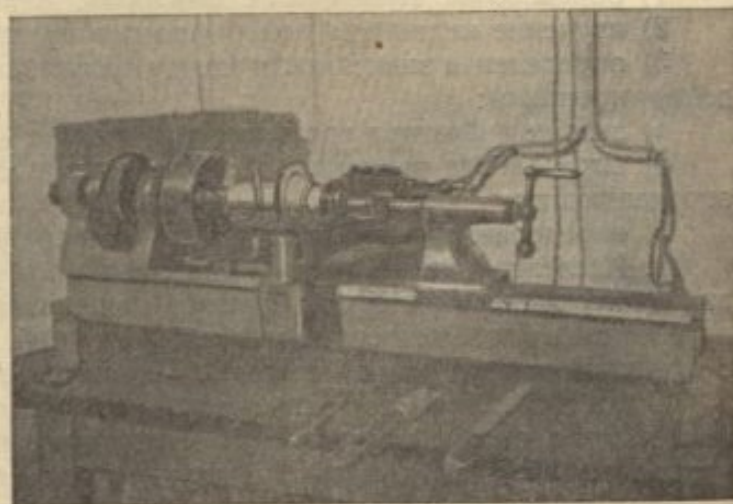


Рис. 2.

и быть опорой для двух неподвижно закреплённых на нём коллекторных колец из электролитической меди. К коллекторным, кольцам припаивались выводные провода тензометров, наклеенных на цилиндрическую часть оболочки. На специальной консоли, укреплённой на шпинделе задней бабки, были установлены две графитовые щётки, касающиеся колец. Для регулировки силы прижима между щётками и кольцами первые имеют регулируемые винтом пружины. Общий вид установки, инструмента, названных деталей и узлов представлен на рис. 2.

Эксперименты произведены со сплавами АМЦ, Л-62, Д-16, Я1Т, медью и декапированным железом в диапазоне наиболее ходких в производстве толщин: 0,5—1,5 мм.

Влияние смазки, как второстепенного фактора, подробно не исследовалось. Поэтому на основании предварительных экспериментов с различными смазками в качестве смазывающего материала применялось желтое хозяйственное мыло.

Измерительная аппаратура

Для экспериментального исследования поставленных задач применялись проволочные датчики электрического сопротивления. Выбор пал на них не только благодаря их простоте, дешевизне, скорости изготовления, но также благодаря их ничтожному весу и размерам при довольно высоких тензометрических свойствах. Благодаря этим же свойствам удалось полностью исключить влияние самих датчиков на показания измеряемых величин, что в данном случае могло иметь существенное значение, поскольку тонкостенная оболочка находилась в сильном центробежном поле. Сопротивление тензометров составляло $R = 265 \text{ }\Omega$ при базе тензометра равной 10 мм.

Величина сопротивления утечки составляла не менее 15 мегом, что достиглось соответствующим подбором материалов для тензометров. Индуктивность и ёмкость тензометра практически были равны нулю.

Замер интересующих величин производился посредством измерений изменений сопротивления активных датчиков, включённых в мостиковую схему. Нами была использована схема мостика переменного тока, работающая на принципе модуляции тока несущей частоты, при которой на измерительную диагональ моста поступает переменное напряжение тока несущей частоты с амплитудой, промодулированной в соответствии с изменением сопротивления датчика. Значения измеряемых величин определяются по огибающей тока несущей частоты. Для их регистрации применяли шлейфовый осциллограф. Схема измерительного устройства состояла из:

- а) лампового генератора звуковой частоты;
- б) измерительного моста;
- в) усилителя;
- г) выпрямителя;
- д) шлейфового осциллографа.

Генератор переменного тока собран по схеме ДООУ с последующим каскадом усиления. Генератор питает током измерительный мост несущей частоты $8,5 \cdot 10^3$ герц и создаёт начальное смещение на селеновых элементах выпрямителя. При деформации изменение сопротивления тензометров нарушает настройку мостика, вследствие чего в диагонали мостика возникает модуляция тока несущей частоты. Этот ток увеличивался в трёхкаскадных резонансных усилителях, имеющих крутизну $1 \text{ mV } 20 \text{ mA}$ (рис. 3).

Усилители настроены на частоту генератора питания $\sim 6,3 \text{ V}$, $2 \div 3 \text{ A}$ и $250 \text{ V} = 60 \text{ mA}$. Для упрощения записи после усилителей поставлены выпрямители, собранные по круговой схеме из селеновых элементов, которые снимают несущую частоту, оставляя только изменение силы тока, пропорцио;

нальные изменениям сопротивления датчиков. В осциллографе использовались одновременно два шлейфа: в 5 mA и 20 mA .

Питание усилителей осуществлялось от городской сети благодаря феррорезонансному стабилизатору напряжения с выпрямителем (рис. 4).

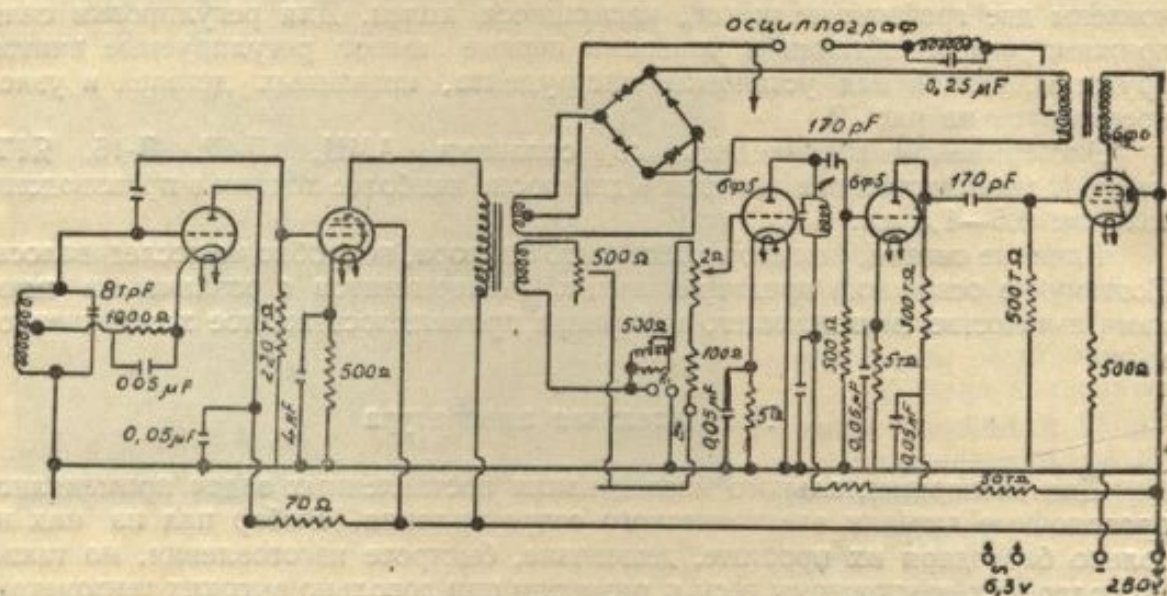


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя с генератором, выпрямителем и измерительным мостом.

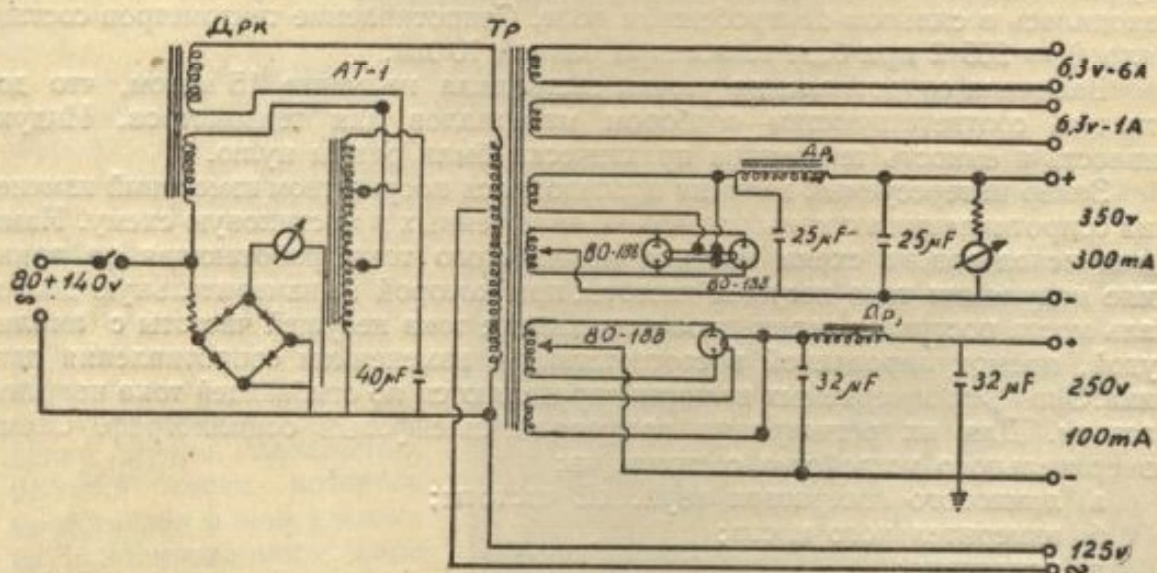


Рис. 4. Принципиальная схема стабилизатора напряжения с выпрямителем.

Методика и результаты экспериментирования

а) Измерение усилия давилника осуществлялось путём замера его составляющих Q_s — перпендикулярной, Q_p — параллельной оси оправки и Q_n — нормальной к плоскости составляющих Q_s и Q_p и направленной вдоль продольной оси инструмента.

Для этого, используя упругие свойства стержня давилника, вдоль его продольной оси вблизи точки опоры наклеивались 3 пары тензометров (две пары на большем плече, два тензометра — на меньшем), в последующем включенных в соответствующие плечи измерительных мостиков. При экспериментировании

давьльник устанавливался на подручнике так, чтобы плоскости, проходящие через центры тяжести наклеенных тензочувствителей, были:

1) перпендикулярна оси шпинделя станка (через тензочувствители для замера Q_{θ} и 2) параллельна оси шпинделя (через тензочувствители для замера Q_{ρ}). Их включение обеспечило замер изгибающих моментов, действующих на большее плечо давьльника при выдавке.

Включение тензочувствителей для замера Q_{ρ} обеспечивало замер продольных усилий, действующих на меньшее плечо давьльника.

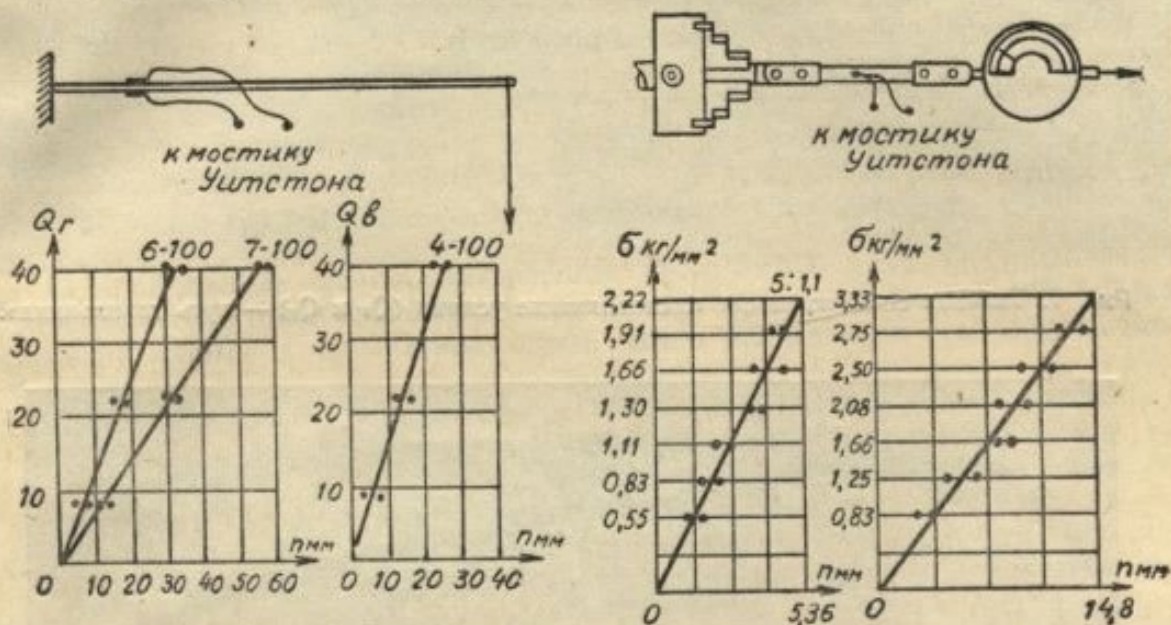


Рис. 5.

Давьльник работает как рычаг. Поэтому, зная соотношение его плечей и располагая тарировочными кривыми (рис. 5), легко расшифровать осциллограммы, а следовательно и определить значение составляющих усилия инструмента. Напряжения в оболочке замерялись с помощью тензочувствителя, наклеенного вдоль её оси на цилиндрическом участке.

Разбаланс измерительного мостика, вызванный силой, деформирующей оболочку, выводился к усилителю с помощью прижима-токосъёмника. Погрешность эксперимента не превышала 5,01%.

б) Эксперименты производились с предварительно подготовленными оболочками (рис. 7), форма которых определялась следующими обстоятельствами: 1) тем, что превращение плоского кружка в коническую оболочку в начальный момент затруднено неудобством подхода давьльника к ребру оправки из-за значительных размеров головки инструмента и 2) что величина усилия давьльника в начальный момент формоизменения плоского кружка в конус в большой мере зависит от индивидуальных приёмов давьщика, что находит выражение в различных видах образующей промежуточных форм выдавливаемого изделия. После образования хотя бы незначительного цилиндрического участка процесс становится установившимся с ясно выраженным характером каждой компоненты усилия давьльника.

в) На осциллограммах (рис. 7—8) показаны кривые компонент Q_{θ} (верхняя кривая) и Q_{ρ} (нижняя кривая) в функции пути инструмента, записанные для



Рис. 6.

случая выдавки деталей с толщиной стенок, равных толщине исходной заготовки.

Выступающая часть кривых соответствует положению давилы на конической части образующей детали. Горизонтальный участок кривых (нулевое

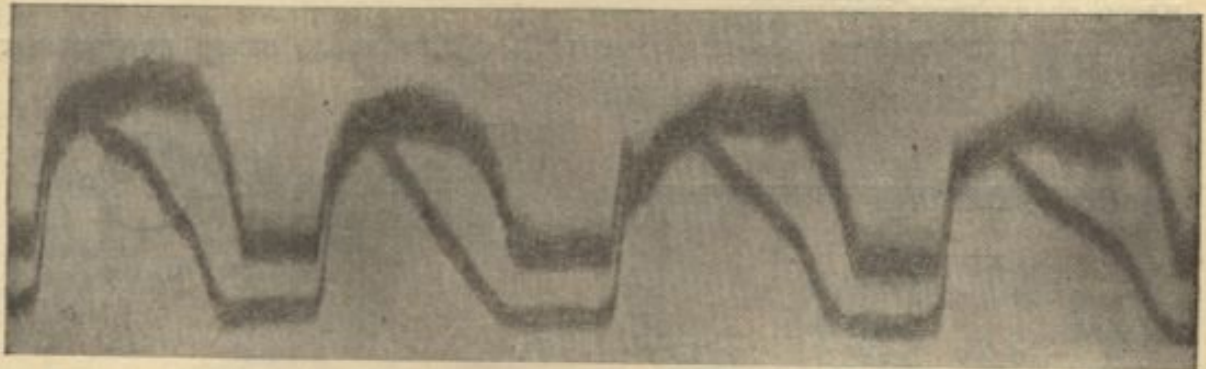


Рис. 7. Типовая осциллограмма «составляющие усилия (Q_1 и Q_2) — путь давилы».

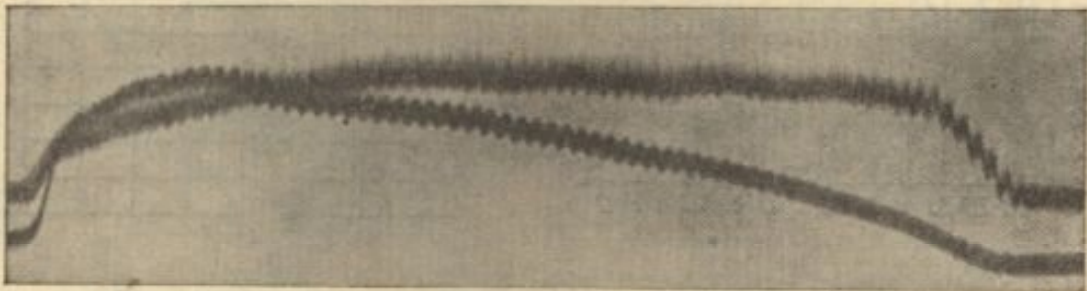


Рис. 8.

значение) соответствует переносу инструмента в исходное положение. Как видно из приведённых осциллограмм компонента Q_2 , направленная, как и усилие пуансона при свёртке параллельно оси изделия, сохраняет своё значение приблизительно постоянным на всём протяжении хода давилы. Усилие же пуансона, соответствующее по направлению действия Q_2 , имеет совершенно иной характер (рис. 9). Составляющая Q_1 изменяется по закону треугольника. Компонент Q_n (нижняя кривая, рис. 10) сохраняет своё значение на всём протяжении хода инструмента. Кривые составляющих усилия деформирования за один проход давилы на всех этапах процесса сохраняют свой характер. Поэтому приведённые результаты исследования для случая одного прохода давилы вдоль образующей детали, а именно: от ребра оправки к открытому краю оболочки могут считаться общими, так



Рис. 9.

как принципиального различия в результатах экспериментов при движении давилы от открытого края оболочки к ребру оправки не обнаружено.

г) Замер напряжений на цилиндрическом участке оболочек вызывает значительные упругие напряжения в её цилиндрической части (рис. 11—12),

в то время как напряжения на цилиндрическом участке штампуемой детали достигают предела текучести и отличаются по характеру. Сравнение кривых, представленных на рис. 7, 8, 9, 10, 11, 12 показывает, что предполагаемая аналогия процессов свёртки и выдавки в части идентичности кривых: «Усилие — пути инструмента» и «Напряжение на цилиндрической части детали — пути инструмента» не имеет места.

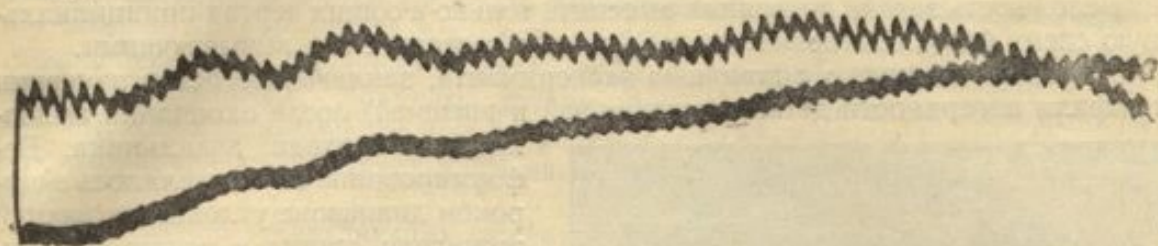


Рис. 10. Типовая оциллограмма «составляющие усилия (Q_n и Q_e) — путь давилника»

д) Проведённые опыты, доказавшие несостоятельность предположения об аналогичности процессов свёртки и выдавки, обусловили тщательный анализ изменений формы координатной сетки. Было найдено, что совпадение изме-

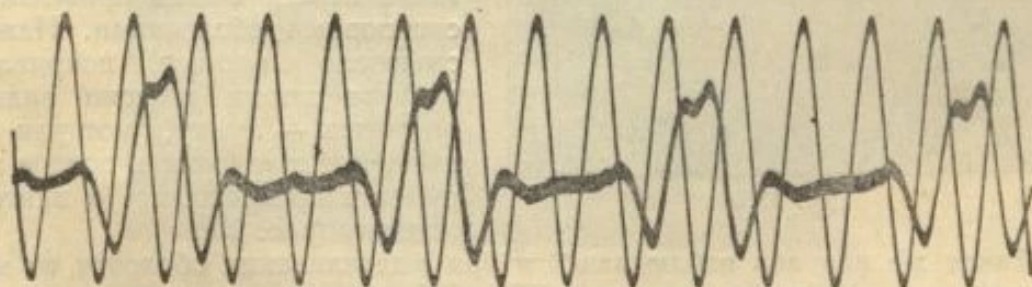


Рис. 11. Типовая оциллограмма кривой «напряжение σ_e — путь давилника» и 50 периодного тока.

нений сетки носит чисто геометрический характер и не указывает на аналогию процессов в более существенных чертах.

Точные промеры показали, что количественно изменения формы сеток в общем случае различны. Одинаковые лишь в случае, если полученные оболочки

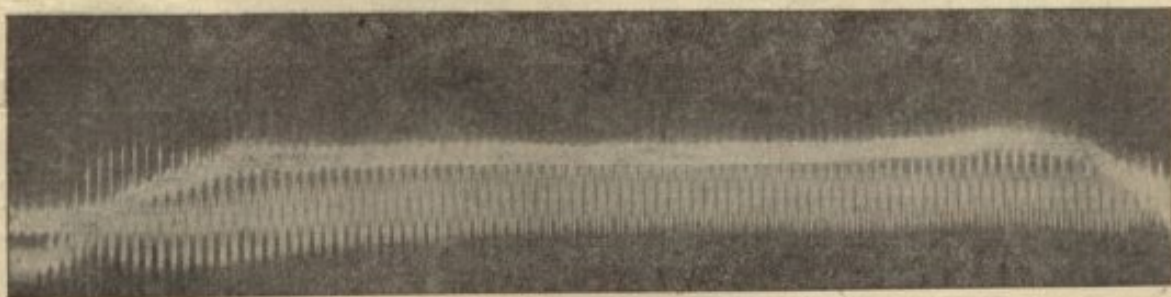


Рис. 12. Типовая оциллограмма кривых « Q и σ_e — пути давилника».

характеризуются толщиной стенок, равной толщине исходной заготовки; различны, если деталь выдавливается с утолщением или неравномерным по высоте утончением стенок. Таким образом, аналогия процессов свёртки и выдавки и в этом случае отсутствует.

Объяснение явлений, происходящих при обработке листового металла на давилных станках, надо искать в сущности механизма деформирования.

Физическая сущность механизма деформирования металла при его обработке на давяльных станках

Поставленная задача сводится к определению напряжений и деформаций в упругой тонкостенной оболочке, находящейся под действием сосредоточенной нагрузки, вызывающей локальную пластическую деформацию. Очевидная сложность задачи позволила выяснить только в общих чертах принципиальную схему формоизменения металла и связь с силами, его вызывающими.

Решение получено с помощью эксперимента, заключавшегося в изучении профиля поверхности детали (внутренней и внешней) после окончания выдавки или прохода давяльника. Деформирование осуществлялось в широком диапазоне угловых скоростей шпинделя станка и подаче инструмента. Такой метод позволил зафиксировать формоизменение выдавливаемого изделия в пределах одного оборота станка. С целью получения более четко выраженной картины пластического деформирования металла первые опыты проведены со свинцовыми оболочками. Нажатие создавало местное искривление контура детали и ясно видимый отпечаток — лунку, которая при вращении заготовки и подаче инструмента превращалась в винтовую канавку (рис. 13).



Рис. 13.

Такая же картина наблюдалась и при выдавливании оболочек из менее пластического материала, нежели свинец. На основании подобным способом проведенных экспериментов предложена следующая рабочая гипотеза механизма деформирования, являющаяся первым приближением к рассмотрению связи деформации — напряжения: материал под давяльником вминается и ведёт себя как мембрана, прогибающаяся под его нажимом. Тогда весь процесс выдавки сводится к непрерывному перемещению в упругой среде пластического «озерца», дно которого, представляя пластический очаг, всё время находится ниже уровня пограничной упругой зоны, и это непрерывное понижение дна луночки вследствие вращения заготовки приводит к окончательному формированию изделия.

Термин мембрана надо считать условным, поскольку материал луночки, обладая особенностями, свойственными мембране, претерпевает воздействие изгибающих напряжений.

Однако изгибающие напряжения не являются главенствующими, ибо, как показали дополнительные опыты, материал в лунке по всей толщине переходит в пластическое состояние. Следовательно, формоизменение металла при выдавке определяется распределением деформаций и напряжений в области контакта инструмента и детали.

Изучение изменений формы координатной сетки при выдавке по схеме наружного выдавливания показывает, что в тангенциальном направлении материал сжимается, а в радиальном — удлиняется. Это значит, что при наружном выдавливании формоизменение от плоского кружка к оболочке получается за счёт сжатия металла в лунке в тангенциальном и удлинения его в радиальном направлениях.

Исследование показало, что соотношение деформаций в лунке (укорочение периметра поперечного сечения и удлинение металла в радиальном направ-

лении) не является величиной постоянной. Главными факторами, определяющими соотношение деформаций в лунке являются:

1) форма и размер инструмента;

2) соотношение радиусов кривизны детали и инструмента в месте контакта;

3) величина усилия давяльника и соотношение величин его составляющих в течение времени перемещения вдоль образующей детали. Изменение их позволяет ведение направленного процесса, то есть позволяет выдавливать детали с утолщением или утонением стенок изделия, ускорять или замедлять осуществление процесса, получать детали различного качества поверхности (рис. 14). Осуществление процесса выдавки приложением большего усилия деформирования способствует удлинению материала в радиальном направлении.

Соотношение составляющих усилия давяльника определяет форму после прохода инструмента. Если образующая характеризуется большей кривизной

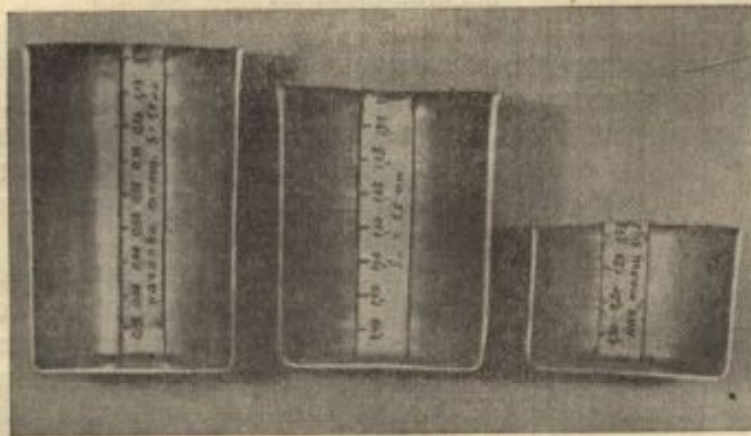


Рис. 14. Выдавленные детали с переменной и постоянной толщиной стенок.

вогнутости внутрь детали, удлинение будет большим. Но если образующая выпукла, удлинение будет минимальным, а сжатие металла в тангенциальном направлении (посадка металла) — наибольшим. Выдавка деталей с равномерной толщиной стенок происходит, если образующая представляет логарифмику вогнутостью внутрь или приближается к прямой.

Увеличение радиуса кривизны рабочей части давяльника в продольном и поперечном его направлениях обеспечивает большую посадку металла и меньшее его удлинение.

Размер инструмента определяет соотношение радиусов кривизны давяльника и оболочки в точке их контакта. Чем это соотношение меньше, тем удлинение больше. Наоборот, большее их соотношение обеспечивает большую посадку металла и меньшее его удлинение. Поэтому оказывается необходимым (особенно при выдавке деталей значительных размеров) для различных точек вдоль образующей детали располагать давяльниками одной формы, но различными по своим размерам.

Поскольку использование большого количества давяльников, отличающихся по форме и размерам, в течение одного прохода инструмента затруднительно, при ручном ведении процесса изготавливается один давяльник, рабочий конец которого в каждом сечении по длине его рабочей части имеет переменные форму и размер. Поворотом и подачей вдоль продольной оси обеспечивается желаемый результат.

Из практики известно, что наиболее применимыми являются давяльники различных размеров по форме челнока. Направление движения инструмента

вдоль образующей детали также влияет на соотношение деформаций в лунке. В практике обычно считают, что посадка металла бывает лишь в случае движения давилника от открытого края заготовки к ребру оправки. Такое утверждение неверно, так как можно произвести посадку металла и перемещением инструмента от ребра оправки к открытому краю заготовки. Всё зависит от первоначальной формы образующей детали перед проходом давилника и от соотношения компонент его усилия, то есть формы образующей детали после прохода. Так, например, если образующая детали выпукла, движение давилника в произвольном направлении обеспечивает интенсивную посадку. Выводы подтверждаются работой опытных давилщиков, осуществляющих выдавку движениями инструмента в обоих направлениях. Их метод выдавливания исключает холостые ходы, отчего производительность увеличивается.

Опыт теоретического обобщения механизма деформирования металла выдавливанием

Сложность аналитического исследования явлений, имеющих место в области контакта давилника и оболочки, очевидны. Поэтому в качестве расчётной была принята упрощённая схема деформирования металла под головкой инструмента, что позволяет произвести теоретическое обобщение, удовлетворяющее целям практики.

Согласно этой схеме материал оболочки при её деформировании, подобно вязкой жидкости, плотно облегает поверхность инструмента. Затем, основываясь на принятой гипотезе, находим зависимость для напряжения на периферии лунки, связывая это напряжение с толщиной материала, нормальной силой и деформацией за один проход давилника (стрела прогиба мембраны).

Считая лунку мембраной круглой формы, а площадку контакта плоской, предполагаем, что мембрана нагружена равномерно-распределённой нагрузкой интенсивности $q = \frac{Q_n}{\pi a^2}$, где Q_n — нормальная сила, a — радиус дна лунки. На единицу длины периферии мембраны приходится нагрузка $P = \frac{a \cdot 1}{2} \cdot q$ (рис. 15 и 16).

Напряжение на периферии мембраны равно $\sigma_a = \frac{N}{S}$, где S — толщина материала.

Но $N = T \cos \beta$, а в свою очередь $T = \frac{P}{2 \sin \beta}$. Заметив, что $\operatorname{tg} \beta = f/a$, где f — прогиб мембраны, получили

$$\sigma_a = \frac{P}{2S} \operatorname{ctg} \beta \quad \text{или} \quad \sigma_a = 0,25 \frac{q \cdot a^2}{s \cdot f} = 25 \frac{Q_n}{\pi s \cdot f}. \quad (1)$$

Гипотеза лунок, оформленная в виде уравнения (1), объясняет ряд явлений формообразования металла при его обработке на токарно-давилных станках. Так, из уравнения (1) следует, что σ_a не должно быть больше предела теку-

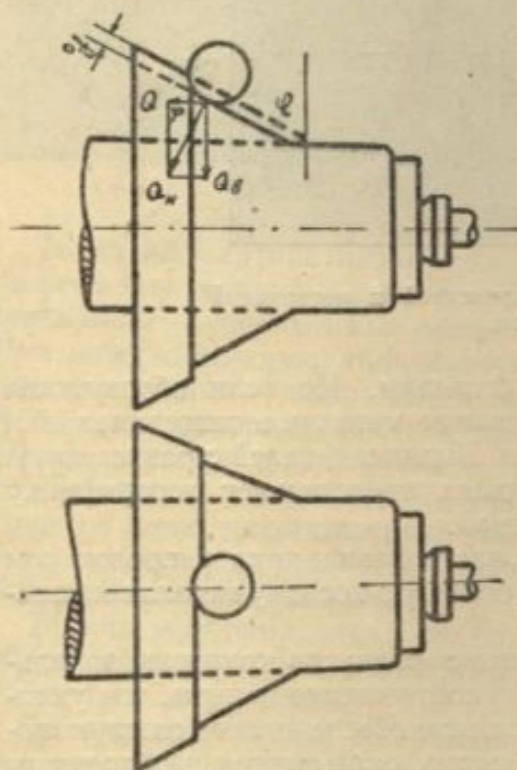


Рис. 15.

части материала при данной степени деформации. В противном случае может произойти обрыв материала. Поэтому величина Q_n должна быть определённой, а формула может быть использована для определения оптимального значения усилия давилника.

Если значение σ_a меньше предела текучести, то процесс выдавливания не осуществится. Очевидно, что при нормальном течении процессов σ_a близка к пределу текучести при данной степени деформации.

Из формулы видно, что Q_n не есть величина постоянная для данной толщины материала, что величина Q_n может принимать раз-

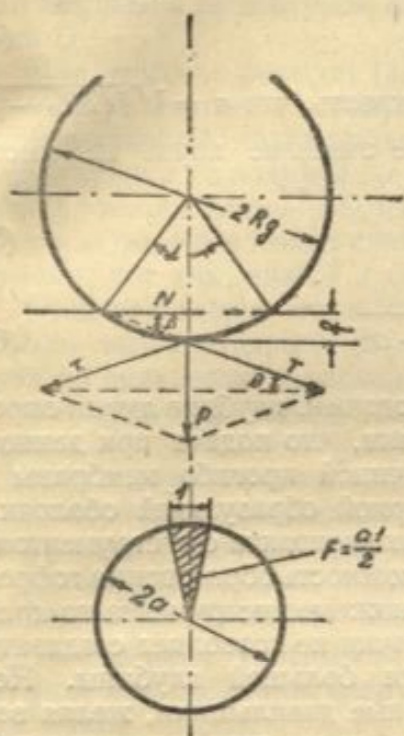


Рис. 16.

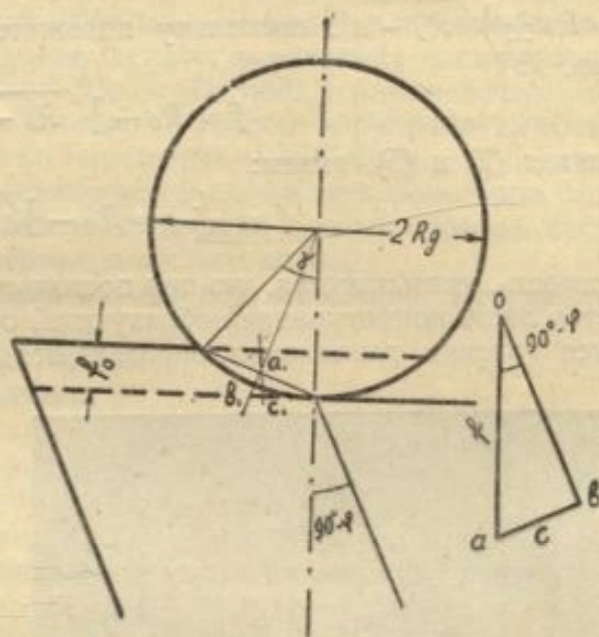


Рис. 17.

личные значения в зависимости от величины f . Кроме того, подогрев заготовки в процессе деформирования уменьшает Q_n . Изменение толщины материала при одинаковом значении f вызывает соответствующее изменение Q_n .

Рассматривая в каждый данный момент картину распределения прогибов под инструментом, можно выражению (1) придать иной вид: из ΔOab (рис. 17) получим $L = f \cos \varphi$, откуда

$$f = \frac{L}{\cos \varphi} \quad (2)$$

где:

L — подача инструмента за один оборот шпинделя. При этом, не превышая погрешности в 5%, считаем, что $\cos \frac{\alpha}{2} = 1$, так как величина обжатия оболочки по нормали к образующей за один проход инструмента не превышает $0,1R_d$. Заменяв в выражении (1) величину f через её значение (2), получим:

$$\sigma_a = 0,25 \frac{Q_n \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot s \cdot L},$$

но $L = \frac{l_w}{n}$, где l_w проекция пути движения давилника на ось оправки; n — число оборотов шпинделя станка за время прохождения инструмента вдоль пути l_w .

$$\text{Тогда } \sigma_a = 0,25 \frac{Q_n \cdot n \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot l_{\text{но}} \cdot s}$$

Выразив Q_n через Q_z ,

получим:

$$\sigma_a = 0,25 \frac{Q_z \cdot n}{\pi \cdot l_{\text{но}} \cdot s}. \quad (3)$$

Считая напряжение под тензометром равным $\sigma_B = \sigma_a \cdot \sin \varphi$, получим:

$$\sigma_B = 0,25 \frac{Q_z \cdot n \cdot \sin \varphi}{\pi \cdot s \cdot l_{\text{но}}}. \quad (4)$$

Из геометрических соотношений не трудно показать, что $a = \sqrt{f(2R_0 - f)}$ и $f = R_0 \pm \sqrt{R_0^2 - a^2}$; поскольку положительное значение корня не имеет смысла, то

$$f = R_0 - \sqrt{R_0^2 - a^2}. \quad (5)$$

Сравнивая (2) и (5), имеем:

$$f = \frac{L}{\cos \varphi} = R_0 - \sqrt{R_0^2 - a^2}. \quad (6)$$

зависимость, указывающая, что при постоянстве подачи L глубина лунки определяется лишь конфигурацией образующей оболочки, что подача при данном радиусе головки давилника определяется величиной прогиба мембраны f



Рис. 18.

и формой образующей оболочки в точке контакта с инструментом. Возможность образования гофров при нажиме инструмента на крае оболочки не позволяет создавать лунки большой глубины. Неопытные давилники, желая все же побольше сократить периметр сечений, прилегающих к открытому краю, придерживают в этом месте давилник в течение большого числа оборотов. Получающаяся при этом форма образующей характеризуется большими значениями $\cos \varphi$, а, стало быть, малыми значениями f . Согласно формуле (1) в месте контакта воз-

никают значительные напряжения, вызывающие нежелательное утонение и даже обрыв (рис. 18).

Такое явление особенно характерно для оболочек больших размеров, но малой толщины, которые легко склонны к потере устойчивости и поэтому гофрятся. Производить выдавку таких деталей необходимо увеличением жесткости края детали и уменьшением кривизны рабочей части давилника.

Из формул (3) и (4) видно, что при постоянном времени выдавки усилие давилника $\vec{Q}_p = \vec{Q}_a + \vec{Q}_z$ может быть уменьшено при увеличении числа оборотов шпинделя станка, и, наоборот, усилие должно быть увеличено, если количество оборотов шпинделя станка уменьшено. Формула (3) связывает главные факторы, влияющие на процесс выдавливания и, будучи простой, имеет практическое значение, так как, пользуясь ею, можно не только рассчитывать режим обработки и, таким образом, заранее проектировать технологический процесс, но и поставить вопрос о механизации токарно-давилных работ.

Механизация этих работ должна развиваться в направлении использования копиров для всех проходов инструмента с тем, чтобы обеспечить оптимальную величину деформации в течение прохода давилника и определить форму образующей детали: применение копиров обеспечит ведение направленного процесса. Зная толщину материала S , число оборотов n шпинделя станка в течение одного прохода инструмента вдоль образующей выдавливаемой детали, величину подачи L , располагая контуром детали после прохода инструмента (или задавая её контуром перед проходом), легко определить усилие давилника Q_n .

Для этого по формуле (4) определяем величину Q_s и, зная величину угла φ в любой точке вдоль образующей, находим $Q_s = Q_n \operatorname{tg} \varphi$. Поскольку величина составляющей Q_n не воспринимается давилником из-за уравнивания её силами трения на подручнике и упорном штифте, вызываемых составляющими Q_s и Q_z , знание величин Q_s и Q_z полностью определяют усилие рабочего. Предложенная формула может считаться исходной в вопросе нормирования времени выдавки, так как, зная f и Q_n , легко определить требуемое n .

Отмечаем также, что анализ расходуемой энергии электромотором станка показал незначительное её превышение в течение одного прохода инструмента по сравнению с расходом энергии холостого хода.

Формула (4) нашла экспериментальное подтверждение. Переменными были:

- 1) толщина обрабатываемого материала;
- 2) величина коэффициента выдавки;
- 3) количество оборотов шпинделя станка;
- 4) предварительная степень деформации металла; число полученных осциллограмм достигало 200 штук.

Приведённые зависимости справедливы при устойчивом движении заготовки (кружка) или оболочки, нагружённых осесимметрично сосредоточенной силой давилника.

В случае, если устойчивое движение обрабатываемой детали не имеет места, закон, связывающий, например, подачу и линейную скорость детали будет иным. Поскольку в задачу нашего исследования не входило глубокое изучение влияния центробежного эффекта на процесс выдавки, подробно на этом вопросе не останавливаемся.

При выводе формулы (3) мы пренебрегли тепловыми напряжениями, вызванными силами трения, так как повышение температуры обрабатываемого материала не таково (менее 100°C), чтобы изменились его механические свойства. Не учитывались, как пренебрежительно малые, не влияющие на процесс выдавки напряжения, вызванные действием инерционных сил, и напряжения изгиба и кручения оболочки вокруг заделки у доньшка.

Значение фактора вращения заготовки или детали в процессе выдавливания

§ 1. Техническая литература не содержит указаний, пользуясь которыми можно определить оптимальный режим процесса выдавливания.

Это и не удивительно, так как роль фактора вращения не определена. В практике же давилных работ этот вопрос решается экспериментально и в зависимости от квалификации рабочего не всегда лучшим образом.

Однако известно, что выбор числа оборотов шпинделя станка зависит, главным образом, от диаметра оправки ширины фланца заготовки, определяемой, как разность $\frac{D_3 - d_{\text{опр}}}{2}$, а также толщины и физических свойств обрабатываемого материала, и что вне зависимости от параметров выдавки факт вращения является обязательным для осуществления процесса.

Экспериментальное изучение этого вопроса позволило установить, что усилие выдавки, приложенное к неподвижной заготовке или детали, может вызвать вмятину — лунку в месте контакта инструмента и металла.

Увеличение усилия давилника приводит к значительному упругому искажению также формы поперечного сечения детали, далее — без заметного увеличения глубины лунки к «провалу» металла под давилником и образованием гофра на стенках изделия.

Попытка вызвать желаемое изменение формы сообщением детали некоторой скорости вращения (поворотом шпинделя станка) удаётся только для таких пластичных металлов, как, например, свинец.

По мере увеличения скорости вращения обрабатываемого изделия характер протекания процесса изменяется, так как оказывается возможным приложить большее усилие давилника, которое, приводя металл в состояние текучести в месте контакта, не вызывает необратимого смятия стенок детали, лишь упруго деформирует оболочку, отчего вращение последней характерно «качающимся ходом».

Дальнейшее увеличение числа оборотов шпинделя станка приводит к успешному проведению процесса выдавливания, характеризующегося интенсивным местным деформированием зоны металла под давилником, что обеспечивает желаемое изменение формы изделия, а также устойчивостью движения детали, при которой форма поперечного сечения оболочки в плоскости приложения большего усилия давилника не изменяется, то есть «качающийся ход» не имеет места.

Такой характер протекания процесса считается нормальным, а соответствующее этому число оборотов шпинделя станка при прочих равных условиях представляет оптимальный режим выдавки.

Наконец, при чрезмерном увеличении числа оборотов детали приложение даже незначительного усилия давилника вызывает столь интенсивное течение металла под давилником, которое может привести к заметному утонению или разрушению стенок изделия, особенно тонкостенного.

Результаты экспериментов по установлению зависимости угловой скорости детали от параметров выдавки показали, что при постоянной величине диаметра оправки увеличение диаметра заготовки, то есть уменьшение коэффициента выдавливания, требует увеличения числа оборотов шпинделя станка.

Увеличение диаметра оправки при постоянном значении диаметра заготовки, то есть уменьшении ширины фланца, позволяет осуществить выдавку при меньшем числе оборотов. То же может быть и при увеличении толщины материала, а также при увеличении диаметра оправки и заготовки, но при той же ширине фланца кружка. Так, например, выдавливание деталей из алюминия и его сплавов толщиной $0,75 \div 1$ мм можно охарактеризовать следующими примерами:

1) При диаметре оправки $d_{\text{опр}} = 100$ мм, заготовка диаметром $D_3 = 150$ мм хорошо выдавливается в интервале чисел оборотов $n_{\text{шп}} = 475 \div 1500$ об/мин.

Но при $D_3 = 350$ мм процесс выдавливания протекает хорошо, если $n_{\text{шп}} = 950 \div 1500$ об/мин, то есть нижний предел чисел оборотов с увеличением D_3 при том же значении $d_{\text{опр}}$ возрастает.

2) При диаметре заготовки, например, $D_3 = 200$ мм выдавливание изделия по оправке $d_{\text{опр}} = 25$ мм протекает хорошо в интервале чисел оборотов $n_{\text{шп}} = 950 \div 1500$ об/мин, тогда как выдавливание деталей по оправке $d_{\text{опр}} = 100$ мм обеспечивается при $n_{\text{шп}} = 500 \div 1500$ об/мин.

Соответственно можно привести и другие примеры, которые показывают также, что режим выдавливания при данных параметрах рабочей части инструмента, заготовки и оправки лучше представлять величиной оптимальных чисел оборотов.

К сожалению, ряд авторов пытаются представить режимы выдавливания в виде линейной скорости выдавливаемых деталей или установлением чисел оборотов шпинделя станка без учёта абсолютных размеров оправки и коэффициента выдавливания [8], [9].

§ 2. Поскольку детали неподвижные или вращающиеся с числом оборотов, не достигающим оптимального значения, не обеспечивают нормального протекания процесса выдавливания, возникает вопрос о значении факта вращения.

Естественно было предположить, что при вращении заготовки в материале возникают напряжения, которые, складываясь с напряжениями, вызванными действием инструмента-давилника, обеспечивают выдавливание.

Однако подсчёт напряжений, вызванных центробежными силами, показывает их ничтожную величину, что позволяет пренебречь ими.

Это позволило заключить, что эффект вращения иной. Для проверки сделана попытка произвести выдавливание неподвижных заготовок вращающимся инструментом. Эксперимент показал, что выдавка по такой схеме возможна, если инструменту сообщена скорость, соответствующая оптимальному режиму выдавки, то есть процесс выдавки принципиально возможен и в случае вращения заготовки или детали при неподвижном инструменте-давилнике и, наоборот, но при этом относительная скорость вращения их должна достигать оптимального значения.

Для дальнейшего изучения эффекта вращения дополнительно проведён ряд экспериментов.

Определение деформаций и напряжений выдавливаемых деталей

Исследование произведено для случая нагружения инструментом-давилником неподвижных и вращающихся деталей благодаря применению проволочных датчиков сопротивления и нанесения на поверхность заготовки или детали хрупкого покрытия (смесь канифоли и парафина).

Изучение поверхности неподвижного кружка и конусной оболочки (см. выше), произведённое в процессе статического нагружения, показало следующий характер разрушения канифоли: наибольшее растрескивание в виде концентрических окружностей было в точке контакта инструмента и металла, что свидетельствует о растяжении слоёв материала. По достижении некоторой глубины лунки происходило также растрескивание покрытия вдоль «параболической» кривой, ветви которой упирались в открытый край оболочки или кружка, в фокусе которой находилась точка приложения усилия давилника. Растрескивание канифоли вдоль ветвей кривой показывает линию перегиба стенки оболочки или кружка, по которой при дальнейшем увеличении усилия возможен «провал» металла, то есть смятие стенки с образованием гофров. На других участках растрескивания слоя канифоли не обнаружено.

Неравномерность распределения деформации была обнаружена также и применением проволочных датчиков.

Приведённые выше осциллограммы (рис. 11—12) показывают, что и в случае нагружения вращающихся деталей их деформации осесимметричны, что обуславливает благодаря вращению возникновение знакопеременных напряжений.

Другая серия экспериментов была посвящена определению предельной величины усилия давилника, воспринимаемой неподвижной или вращающейся пластинкой-кружком или оболочкой до потери устойчивости, то есть до образования гофров.

С этой целью, используя несложное рычажное приспособление, производилось, как и в случае выдавливания, нагружение давилником закреплённого кружка, находящегося в состоянии покоя или вращения. Кружки вырезывались из материала АМЦ Л-0,3, АМЦ Л-0,8 и латуни Л-62, Л-0,5, диаметром 135 мм, 200 и 250 мм; $d_{\text{опр}} = 40$ мм, усилие изменялось в интервале (3—14) кг;

число оборотов шпинделя станка было равным $n_{\text{шп}} = 0,102, 144, 205, 280, 440, 653, 845, 1250$ об/мин.

Критерием оценки устойчивости, как в случае нагружения её в статическом, так и в состоянии вращения, был условно принят момент необратимого «провала» материала пластинки под нагрузкой, то есть образования гофра.

Опыты показали, что устойчивость пластины-кружка возрастает по мере увеличения числа оборотов шпинделя станка и толщины заготовки, а также уменьшения её радиуса и приближения точки приложения усилия к центру заготовки.

Проведением экспериментов также установлено, что при нагружении невращающихся тонкостенных (до 0,4 мм) или значительных размеров кружков или оболочек происходит одновременно с образованием местной лунки деформирование стенок оболочки также в зоне, охватывающей значительную поверхность внутри контура «параболической кривой», что, вызывая изменения формы поперечного сечения детали, может привести к провалу материала и образованию гофров, и тем скорее, чем меньше жёсткость заготовки или выдавливаемой детали и больше абсолютные размеры рабочей части инструмента, непосредственно воздействующей на металл.

При прочих равных условиях сообщение детали оптимальной угловой скорости изменяет характер деформирования. В этом случае происходит только местное деформирование металла в области контакта инструмента и детали при сохранении формы поперечного сечения оболочки в месте приложения усилия давилника.

Таким образом, в процессе выдавливания вследствие приложения осесимметричной силы происходит непрерывное нагружение и разгружение частей выдавливаемого изделия, повторяющееся с каждым оборотом шпинделя станка или вращающегося инструмента, которое обуславливает неравномерность распределения деформаций и наличие знакопеременных напряжений.

Процесс выдавливания протекает успешно, если прилагаемое усилие давилника, не нарушая устойчивости движения и не сминая детали образованием гофров, вызывает локальную пластическую деформацию металла. Этому в значительной мере способствует вращение детали или инструмента, изменяющее характер деформирования, в результате чего деформация кружка или оболочки локализуется, что также способствует более интенсивному деформированию металла в точке контакта инструмента и изделия.

Вращение детали или инструмента повышает устойчивость движения обрабатываемого изделия и, способствуя увеличению предельного усилия давилника, достаточного, чтобы смять заготовку или деталь (вызвать гофр), обеспечивает интенсификацию процесса выдавки.

Попытка определения минимального коэффициента выдавливания

§ 1. При свёртывании листового металла напряжения на цилиндрическом участке детали достигают предела текучести. Поэтому коэффициент вытяжки при свёртке со складкодержателем определяется отрывом дна детали, то есть прочностным фактором.

Выше показано, что на цилиндрическом участке выдавливаемой детали напряжения упругие, а по характеру изменения — знакопеременные. Поэтому возникает вопрос определения минимального коэффициента выдавливания. Интересно, что начальный этап выдавки характеризуется превращением плоского кружка в оболочку по форме усечённого конуса. Исследование показало, что такой переход детали не всегда возможен, так как при определённых соотношениях диаметров оправки и заготовки $m = \frac{d_{\text{опр}}}{D_3}$ края кружка при попытке превратить его в оболочку указанной формы гофрятся. Гофрирование (потеря устойчивости) предотвращает дальнейшее выдавливание. Величина m_{min} , при которой наблюдается это явление, есть предельной. Предельное значение m_{min}

может быть практически несколько уменьшено подкладыванием твёрдого предмета во внутрь оболочки при нажатии давилником или посадкой краёв кружка на посадочном станке Гавриленко.

Образование гофров можно наблюдать на различных стадиях процесса выдавливания, при этом различают два случая:

- 1) когда сила приложена вдали от края оболочки;
- 2) краевая задача, когда сила приложена у внешней кромки кружка или оболочки. Наиболее опасным из-за гофрообразования является момент превращения плоского кружка в поверхности усечённого конуса, когда инструмент находится у внешней кромки заготовки, так как даже незначительное превышение допускаемой силы давилника вызывает гофр. Схематически эта стадия выдавки представляется в виде вращающегося кружка или конусной оболочки особо большой конусности, нагружённой сосредоточенной силой, приложенной осеасимметрично. Таким образом, гофрообразование пластин при выдавке есть результат изгиба детали в области необратимых деформаций.

Вопрос гофрообразования оболочек и плит, нагружённых сосредоточенной нагрузкой, настолько сложен, что даже приближённых аналитических зависимостей не удалось получить. Экспериментально было обнаружено, что потеря устойчивости пластин и оболочек при выдавке, а следовательно и коэффициент выдавки в диапазоне указанных толщин материала практически от толщины материала не зависит (если угловая скорость кружка или оболочки обеспечивает сохранение формы поперечного сечения детали при нажатии давилником).

Увеличение радиуса оправки влечёт увеличение коэффициента выдавливания. Так, например, при использовании оправок $d_{\text{опр}} = 30 \text{ мм}$ возможно получение деталей из заготовки диаметром $D_2 = 180 \text{ мм}$; при $d_{\text{опр}} = 70 \text{ мм}$ из $D_2 = 260 \text{ мм}$, то есть в первом случае $m_{\text{min}} = 1/6$, а в другом — $m_{\text{min}} = 7/28$.

Коэффициент выдавки также зависит от значения угловой скорости обрабатываемой детали. Если значение угловой скорости ниже оптимального, протекание процессов затрудняется и это приводит к удлинению времени обработки, утонению материала или даже разрушению и тем скорее, чем меньше коэффициент выдавки. В определенном диапазоне чисел оборотов, начиная с оптимального, процесс протекает нормально. Величина коэффициента выдавливания практически не зависит от значения ω . При этом рабочие-давилники легко получают детали, характеризующиеся $m_{\text{выд}} = 0,2 \div 0,3$ для небольших и средних по размерам деталей.

Однако дальнейшее повышение скорости вращения приводит к чрезмерному утонению материала, что вызывается локализацией очага деформирования из-за значительной скорости и появления мгновенных температур в зоне контакта.

§ 2. При определенных значениях $m_{\text{выд}}$ и радиусе сопряжения образующей и дна оправки превращение кружка в конусную оболочку возможно, однако, дальнейшее формообразование заготовки в готовое изделие предотвращается отрывом дна детали. В этом случае величину коэффициента выдавливания определяет не возникновение гофров на внешних кромках заготовки, а нарушение целостности детали, как и в случае свёртывания.

Проведённые опыты показали, что отрыва доньшка не происходит при величине $m_{\text{выд}} > 0,5$ и $r_c = (2 \div 3) S$. Если $m_{\text{выд}} < 0,5$ и $r_c \leq S$, отрыв доньшка возможен и тем раньше, чем большее число оборотов шпинделя станка. Так, например, при выдавке деталей из сплава АМЦ Л-1,5 на оправке, характеризующейся величиной $r_c = 1,5 \text{ мм}$; усилием одинаковой величины была получена следующая зависимость $m_{\text{выд}} = f(\omega)$

$$\begin{aligned} \text{при } n_{\text{шп}} &= 750 \text{ об/мин; } m_1 = 0,15; \\ \text{при } n_{\text{шп}} &= 1500 \text{ об/мин; } m_2 = 0,22. \end{aligned}$$

При постоянном значении r_c , находящегося в интервале $0 \leq r_c \leq S$, уменьшение толщины заготовки, при прочих равных условиях, вызывает некоторое уменьшение величины $m_{\text{выд}}$, а увеличение толщины вызывает увеличение $m_{\text{выд}}$. Так, например, выдавка деталей из сплава АМЦ Л-1,5 и Л-0,5 при $n_{\text{шп}} = 1500 \text{ об/мин}$ показала следующую зависимость:

$$\begin{aligned} \text{при } S = 1,5 \text{ мм; } m_1 &= 0,22; \\ \text{при } S = 0,5 \text{ мм; } m_2 &= 0,17. \end{aligned}$$

Указанные особенности выдавки определяются характером работы материала. В месте перегиба материала вокруг ребра оправки возникают напряжения пластического изгиба и тем больше, чем меньше отношение $\frac{r_c}{S}$, в то время как вся оболочка, кроме точки контакта с инструментом, находится под действием упругих знакопеременных напряжений от изгиба оболочки вокруг заделки у дна детали и работает, таким образом, на усталость. При значениях радиуса сопряжения $r_c < 2 \div 3 S$ и $m_{\text{выд}} > 0,5$ суммарное значение усталостных напряжений и изгиба становится достаточным, чтобы разрушить материал; в этом случае коэффициент выдавки определяется моментом отрыва доньшка.

Следовательно, минимальное значение коэффициента выдавливания различно для различных по величине радиусов сопряжения доньшка и образующей оправки. Если радиус сопряжения $r_c \geq 2 \div 3 S$, что наиболее часто встречается в практике давящих работ, то величина минимального коэффициента выдавливания определяется только складкообразованием краёв заготовки при превращении её в коническую оболочку.

Но если радиус сопряжения $r_c \leq S$, то величина m_{min} определяется прочностным фактором.

§ 3. Изучение профиля выдавленных деталей, произведённое с помощью двойного микроскопа Линника, показало, что по высоте неровностей качество обработанной поверхности может характеризоваться $\nabla \nabla 6$ и улучшается по мере увеличения угловой скорости детали.

§ 4. Располагая выражением, определяющим усилие деформирования, зная закон изменения составляющих усилия давяльника в процессе выдавки и величины мощности мотора, потребного для осуществления процесса, можно строить рабочую машину, способную заменить ручной труд давяльщика, а следовательно, увеличить производительность труда.

Современная техническая литература не содержит, насколько нам известно, материалов, относящихся к теоретическому или экспериментальному изучению процессов выдавки. Настоящая работа охватывает лишь основные факторы, влияющие на процесс выдавки. Однако даже такой объём работы вскрыл определённые потенциальные возможности, заключённые в этом процессе и поставил ряд проблем, требующих дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Баркая. Исследование обработки листового металла выдавливанием, 1951.
2. С. И. Губкин. Теория обработки металлов давлением. Металлургиздат, 1947.
3. В. Л. Кирпичёв. Беседы о механике, 1951.
4. В. Г. Кононенко. Исследование токарно-давящих процессов, 1948.
5. Я. Е. Фридман. Механические свойства металлов, Оборонгиз, 1952.
6. Aviation, 1944, June, vol. 43, № 6. Methods for forming Sheet Aluminium.
7. Herbert and Edlund. «Spinning of Difficult Shapes Simplified by use of Speed Charts», Materials and Methods, № 54, 1949.