ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.Р. КАРГИН, С.Ф. ТЛУСТЕНКО, Ю.С. ГОРШКОВ

ФОРМООБРАЗУЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.7 (075)
ББК
К21



Инновационная образовательная программа «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий»

Рецензенты: д-р техн. наук В. Ю. Арышенский,
канд. техн. наук А. А. Игуменов

Каргин В.Р.

Формообразующий инструмент : учеб. пособие / В.Р. Каргин, С.Ф. Тлустенко, Ю.С. Горшков ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 147 с. : ил.

К21

ISBN

Изложены основы стойкости и надежности формообразующего инструмента. Описан характер разрушения инструмента при эксплуатации. Приведены рекомендации по методам повышения стойкости инструмента. Рассмотрены современные методы изготовления инструмента в кузнечно-штамповочном и прокатно-прессовом производстве.

Пособие рекомендовано студентам специальности 150106, выполняющим курсовое и дипломное проектирование и изучающим курс «Технология изготовления и эксплуатация деформирующего инструмента». Работа подготовлена на кафедре «Обработка металлов давлением».

УДК 621.7 (075)
ББК

ISBN 00000

© Каргин В.Р., Тлустенко С.Ф.,
Горшков Ю.С., 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсификация процессов обработки металлов давлением, включающая комплексную механизацию и автоматизацию, расширение сферы обработки труднодеформируемых и малопластичных материалов, неразрывно связана с повышением стойкости формообразующего инструмента. Кроме того, инструмент во многом определяет качество получаемой продукции и рентабельность производства.

В настоящее время в научно-технической литературе имеется немало сведений, касающихся изготовления, эксплуатации и износа деформирующего инструмента. Однако эти сведения разрознены и не систематизированы. Это обстоятельство побудило авторов к написанию данного учебного пособия, которое применительно к различным видам процессов ОМД. В нем изложен комплекс вопросов, связанных с условиями эксплуатации, технологией изготовления инструмента, описанием основных видов разрушения и выбором оптимальных эксплуатационных режимов работы деформирующего инструмента. Результаты обоснованы анализом большого объема статистического материала, собранного в условиях действующих производств, а также выполнением аналитических расчетов по соответствующим моделям эксплуатации. При этом также рассмотрены основные пути повышения его стойкости. При изложении материала ставилась цель научить будущих инженеров правильно анализировать условия производства, проектировать и внедрять оптимальную конструкцию и технологию изготовления инструмента, а также более обоснованно рассчитывать потребное количество деформирующего инструмента при планировании и подготовке производства.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, определяющих конструктивные особенности деформирующего инструмента, является способ обработки металлов давлением. Различают следующие основные способы обработки металлов давлением: горячая и холодная штамповка, прокатка и прессование, волочение. Внутри каждого способа деформирующий инструмент классифицируется с учетом вида технологической операции, применяемого оборудования и сортамента изготавливаемых изделий.

Существует значительное многообразие типов деформирующего инструмента, применяемого при горячей штамповке. Для изготовления заготовок применяют специальный инструмент – штампы. В соответствии с действующими стандартами штамп является инструментом для обработки давлением, поверхность или контур одной или обеих частей которого соответствует обработанной детали.

Конструкции штампов зависят от их назначения, характера деформации, способа нагружения и других факторов. Так, для выполнения разделительных операций применяют отрезные, пробивные, прошивные и обрезные штампы, для выполнения формоизменяющих операций – молотовые штампы, штампы кривошипных горячештамповочных и гидравлических прессов, штампы горизонтально-ковочных машин и вальцовки, раскатки и выдавливания, а также правочные и калибровочные штампы.

Основными рабочими деталями штампов горячего деформирования являются: верхняя и нижняя части штампа (правая и левая полуматрицы с блоком пуансонов – для ГКМ, вкладыши и ручьевые вставки к ним), пуансон, матрица, контейнер, направляющие колонки.

По характеру деформации штампы могут быть открытыми (для штамповки с облоем) и закрытыми (для штамповки без облоя). По способу нагружения различают штампы статического и динамического нагружения. Например, штампы гидравлических прессов являются штампами статического нагружения, а молотовые – штампами динамического нагружения.

Конструкции штампов зависят также от их габаритных размеров и массы. Различают мелкие штампы и вставки (массой менее 30 *кг*), средние (30–200 *кг*) и крупные (200–20000 *кг*). Размеры и массу штампов учитывают при разработке технологии их изготовления.

При прессовании профилей и труб на гидравлических прессах используют следующие основные виды деформирующего инструмента: матрицы, контейнеры, пресс-шайбы, пресс-штемпели и иглы. Обычно изготавливают конические, плоские, радиальные и комбинированные матрицы. Как правило, сложные по форме матрицы выполняют сборными (разъемными), простые – цельными. Контейнеры изготавливают сборными из двух, трех и более втулок, насаживаемых друг на друга с натягом, что в конечном итоге повышает их прочность и стойкость.

При прокатке основным видом инструмента являются валки различной конструкции и типоразмеров, вращаемые в противоположные стороны. При прокатке листов используют валки с гладкой бочкой, при прокатке фасонных профилей – валки с ручьями на поверхности валка, иногда называемыми калибрами, при прокатке труб – калибры и оправки.

При волочении в качестве деформирующего инструмента используют волоки и оправки. Оправки могут быть неподвижными, подвижными и плавающими.

При холодной листовой штамповке штампы подразделяются на штампы для осуществления разделительных операций (вырубные, пробивные, отрезные и др.), штампы для осуществления формоизменяющих операций (гибочные, вытяжные, формовочные и

др.) и штампы для выполнения прессовочных операций (калибровочные, чеканочные, высадочные и др.). В зависимости от объема производства, формы и размеров штампуемых деталей, точности их изготовления штампы могут быть простыми (однопозиционными) и сложными (комбинированными). В процессе деформирования используются основные рабочие части штампов – матрицы и пуансоны.

По конструктивному исполнению деформирующий инструмент может быть цельным и разъемным (составным или разъемным будем называть, в отличие от сборного, инструмент, имеющий одну или несколько плоскостей разъема). Цельный инструмент, как правило, используется для несложных изделий, обладает большой жесткостью и прочностью. Разъемный инструмент позволяет заменять только изношенные части, выполнять их из менее изнашиваемых материалов, подвергать участки гравюры инструмента дополнительному упрочнению напылением или наплавкой. Изготовление составного инструмента часто менее трудоемко, чем цельного.

1. СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

1.1. ПОНЯТИЕ СТОЙКОСТИ

Стойкость инструмента является случайной переменной величиной, которая может принимать для одного и того же инструмента в одинаковых условиях эксплуатации различные значения [14, 36, 37, 44]. Эта величина определяется качеством инструмента, которое создается в процессе изготовления определенной совокупностью физико-механических, конструктивных и геометрических параметров и условиями эксплуатации (свойством обрабатываемого материала, режимами обработки и т. д.). Влияние этих факторов на стойкость различно по силе и направлению. Указанные условия определяют стойкость как случайную переменную величину. Обычно для характеристики величины стойкости пользуются некоторым ее средним значением $C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i$, где n – общее число испытаний. Однако значение среднего арифметического не является полной характеристикой случайной переменной величины. Практика эксплуатации показывает, что значение средней стойкости не позволяет рассчитать, например, период принудительной замены инструмента, его надежность, оценку нового варианта изготовления инструмента и т. п. Случайная величина полностью описывается, если задан закон ее распределения, т. е. имеется соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями.

Для исследования закона распределения стойкости деформирующего инструмента в реальных условиях наиболее доступным является статистический метод, на основании которого проводится серия испытаний *n*. Полученные значения стойкости группируют в интервалах ΔC_i, где i – номер интервала. Число интервалов N должно быть не менее 6–7. Чтобы определить величину интервала ΔC_i, вначале находят максимальное $C_{\text{макс}}$ и минимальное $C_{\text{мин}}$ зна-

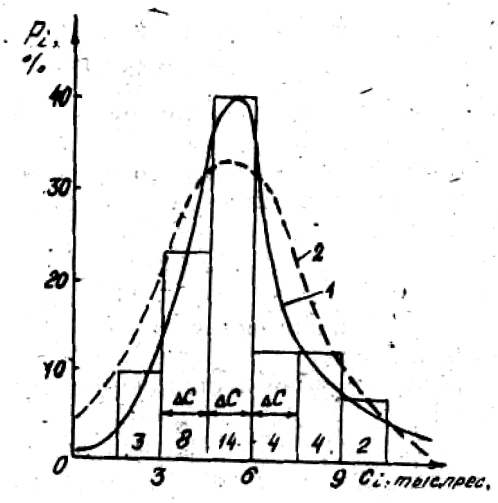


Рис. 1. Гистограмма с наложенными кривыми эмпирического (*1*) и нормального (*2*) распределений стойкости инструмента

чения стойкости в серии испытаний и, задавшись числом интервалов N, находят $\Delta C_i = (C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}})/N$. Потом по оси абсцисс откладывают равные интервалы длиной ΔC_i и подсчитывают число инструментов, попадающих в каждый из этих интервалов (рис. 1). По количеству инструментов в каждом интер-вале n_i определяют частоту рассеяния (плотность распре-деления) $q_i = (n_i / n) \times 100\%$. По оси ординат откладывают значения плотности распределения q_i в соответствующих интервалах. Так как значения q_i приняты равными для всего интервала ΔC_i, то получают диаграмму в виде прямоугольников с шириной, равной интервалу ΔC_i, называемую в теории математической статистики *гистограммой.* Если диаграмму изобразить в виде плавной линии, соединяющей последовательно между собой значения плотности распределения, то получают график эмпирического закона стойкости (рис. 1, кривая *1*).

Анализ результатов большого объема производственных испытаний формоизменяющего инструмента показывает, что эмпирическое распределение стойкости хорошо согласуется с теоретической кривой нормального распределения Гаусса:

$$q_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(C_i - \overline{C})^2}{\sigma^2} \right],$$

где σ – среднеквадратичное отклонение стойкости

$$\sigma \cong \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \overline{C})^2}}{n-1}.$$

В дальнейшем проводят сравнение эмпирического распределения, рассчитав параметры теоретического распределения по формуле

$$q_i^T = \frac{n\Delta C}{\sigma^* \sqrt{2\pi}} \exp\left[-t^2/2\right], \quad t = \frac{C - \overline{C}^*}{\sigma^*},$$

где σ^* и C^* определяют по данным серии испытаний. Функция $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-t^2/2\right]$ табулирована [7]. На основе полученных данных строят теоретическую кривую нормального распределения (рис. 1, кривая *2*).

Быстрым и простым способом проверки на нормальность распределения является способ В. И. Романовского, согласно которому если

$$A = \left| \frac{f^2 - r}{\sqrt{2r}} \right| \le 3,$$

то гипотеза принимается, и она соответствует теоретической кривой нормального распределения. Если A < 3, то гипотеза о согласовании бракуется.

Критерий f вычисляется по формуле

$$f^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(q_i^{\text{Э}} - q_i^{\text{T}})^2}{\sum_{i=1}^{N} q_i^{\text{T}}}$$

где $q_i^{\text{Э}}, q_i^{\text{T}}$ – соответственно эмпирические и теоретические плотности распределения для i-го интервала;

r – число степеней свободы, $r = n - p - 1$;

p – число параметров в теоретическом распределении (для нормального закона $p = 2$).

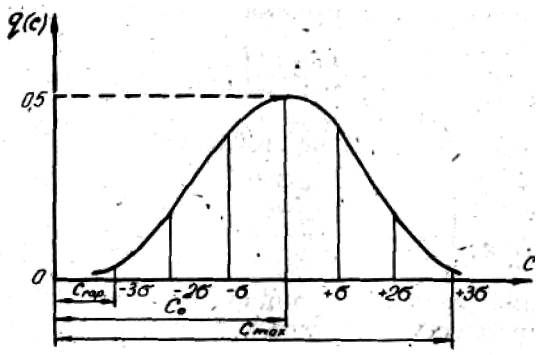


Рис. 2. Средняя C_0, гарантированная $C_{гар}$ и максимальная $C_{макс}$ стойкости инструментов

Согласование теоретической и эмпирической кривых означает, что для анализа стойкости деформирующего инструмента можно использовать теоретическую кривую нормального распределения. В пределах доверительного интервала 3σ в ту и другую сторону от $\overline{C}$ расположено 99,7% всех возможных значений стойкости, в связи с чем нетрудно вычислить гарантированную $C_{гар} = C_0 - 3\sigma$ и максимальную $C_{макс} = C_0 + 3\sigma$ стойкости (рис. 2). Средней стойкости C_0 соответствует вероятность, равная 0,5; т. е. одинаково вероятно, что стойкость инструмента окажется больше и что она будет меньше.

Вид кривой эмпирического закона распределения стойкости позволяет наметить пути повышения стойкости деформирующего инструмента. При нормальном законе распределения стойкости деформирующего инструмента ни один из многочисленных случайных факторов не доминирует над остальными, т. е. не играет преобладающей роли. В таких случаях повысить стойкость инструмента можно только комплексно, путем комбинации различных приемов (изменение конфигурации инструмента, замена материала, охлаждение и т. д.).

На рис. 3 показаны возможные виды эмпирических кривых распределения стойкости, отличных от нормального распределе-

ния. В случае, когда кривая (рис. 3, *а*) близка к закону равной вероятности, на стойкость инструмента оказывает влияние резко доминирующий фактор, например, равномерно изменяющийся во времени износ.

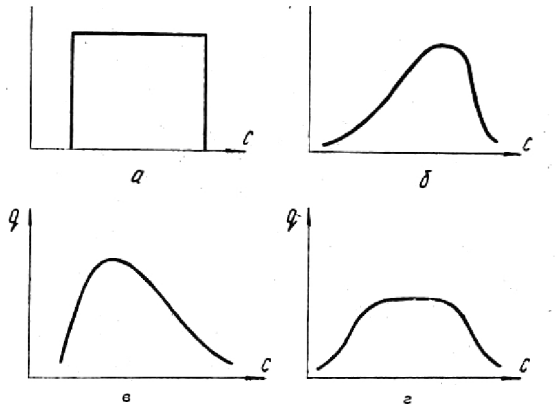


Рис. 3. Виды эмпирических законов распределения стойкости в реальных условиях: *а* – закон равной вероятности, *б* – композиция закона Гаусса и равномерно возрастающей вероятности, *в* – экспоненциальный закон, *г* – композиция Гаусса и закон равной вероятности

Уменьшение влияния этого фактора позволяет повысить стойкость инструмента. Наряду с множеством случайных факторов, задающих в совокупности нормальный закон (рис. 3, *б*), на стойкость инструмента оказывает влияние фактор, замедленно изменяющийся во времени, например разогрев инструмента за счет теплового эффекта. Если часть изготовленного инструмента имеет грубые технологические дефекты (низкое качество термообработки, дефекты материала инструмента), то в результате испытаний стойкость дефектного инструмента будет меньше, чем у остального, и кривая эмпирического распределения будет близкой к экспоненциальному распределению (рис. 3, *в*). На рис. 3, *г* представлен закон, по которому, наряду с множеством случайных факторов, дающих в совокупности нормальное распределение, на стойкость инструмента оказывает влияние преобладающий фактор, равномерно изменяющийся во времени.

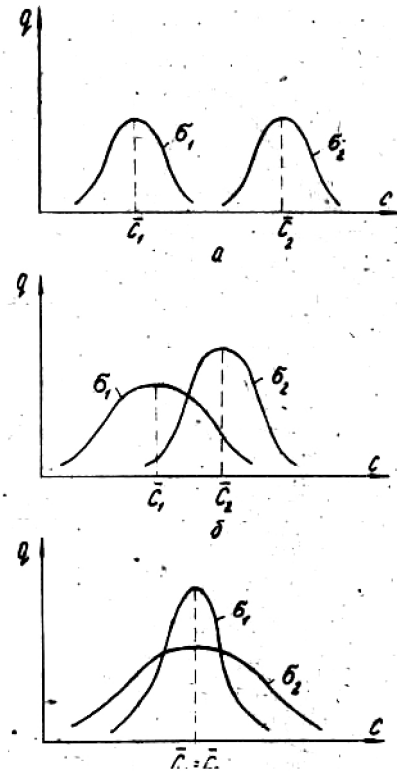


Рис. 4. Сравнение альтернативных вариантов инструмента, имеющих различные значения средней стойкости среднеквадратичного отклонения

Эмпирические законы распределения стойкости могут быть полезными при сопоставлении альтернативных вариантов деформирующего инструмента, отличающихся друг от друга по технологии изготовления, материалами, способами упрочнения поверхности, конфигурацией и т. п. Из рис. 4, *а* видно, что средняя стойкость может служить критерием выбора оптимального варианта, так как $C_2 > C_1 + 3\sigma_1$. Для случая на рис. 4, *б* возникает вопрос: существенно ли различие между C_1 и C_2 или оно носит случайный характер. Ответ на этот вопрос можно получить, сравнив средние значения стойкости инструмента с помощью критерия Стьюдента [7]. Если число испытаний $n < 25$, то используем формулу

$$t = \frac{n_1\sigma_1^{\,2} + n_2\sigma_2^{\,2}}{\sqrt{\left|\overline{C}_1 - \overline{C}_2\right|}} \times \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}},$$

где n_1 и n_2 – число испытаний старого и нового вариантов соответственно;

σ_1 и σ_2 – эмпирические дисперсии в первой и второй сериях.

Если в результате расчетов оказывается, что $|t| \geq t_{кр}$, то $\overline{C_1}$ и $\overline{C_2}$ различаются существенно. Если $|t| < t_{кр}$, то расхождение носит случайный характер. Значение $t_{кр}$ находят по таблице работы [7] при $f = n_1 + n_2 - 2$ и уровне значимости $\alpha = 0{,}05$.

Пример расчета. Шестнадцать матриц, изготовленных по новой технологии, проработали до разрушения в среднем 150 дней, среднеквадратичное отклонение составило 25 дней. Десять матриц, изготовленных по старой технологии, проработали до разрушения в среднем 120 дней, их среднеквадратичное отклонение составило 12 дней. Определить, является ли новая технология с точки зрения стойкости лучше, чем старая, по формуле

$$t = \frac{16 \cdot 25^2 + 10 \cdot 12^2}{\sqrt{|150 - 120|}} \sqrt{\frac{16 \cdot 10(10 + 16 - 2)16 + 10}{}} = 3{,}4 .$$

По таблице из работы [7] для $f = 10 + 16 - 2 = 24$ и $\alpha = 0{,}05$, $t_{кр} = 2{,}064$; что меньше вычисленного. Следовательно, различие в значениях средней стойкости существенно, и новая технология с точки зрения стойкости лучше. На рис. 4, *в* распределение, отображенное кривой *2,* имеет больший диапазон, чем распределение, отображенное кривой *1*. Более качественным является инструмент, стойкость которого описывается кривой *1*, так как обеспечивает незначительный риск и большую стабильность величин стойкости.

Чтобы получить закон распределения стойкости инструмента, иногда целесообразно использовать модели накапливающихся и мгновенных повреждений. Будем считать выход инструмента из строя как результат накопления повреждений, получаемых в случайные моменты процесса деформирования. Повреждение – редкое событие и поэтому можно принять, что число повреждений m следует закону распределения редких событий – закону Пуассона.

$$P_m = \frac{(\lambda C)^m}{m!} e^{-\lambda C}, \; m = 0, 1, 2, \ldots ,$$

где P_m – получения m повреждений при заданной стойкости инструмента C;

λ – интенсивность «потока повреждений», например среднее число повреждений, приходящихся на прокатку единицы массы металла.

Пусть инструмент выходит из строя после получения S повреждений. Тогда плотность вероятности распределения

$$q(C) = \frac{\lambda^s C^{s-1}}{(S-1)!} e^{-\lambda C} \qquad (1)$$

следует закону гамма-распределения.

Такие вероятностные модели строят для оценки стойкости прокатных валков [1]. При этом под стойкостью C понимают массу металла, прокатанного до выхода валков из строя.

Если имеется грубое нарушение хода процесса прокатки ($S = 1$), то формула (1) приобретает вид $q(C) = \mu e^{-\mu C}$. Здесь вместо λ интенсивность обозначена через μ, чтобы подчеркнуть, что речь идет о внезапных повреждениях. Таким образом, распределение стойкости валков при внезапных повреждениях следует показательному закону.

Валки подвергаются разрушению как в результате накопления повреждений (происходит постепенное изменение состояния валков), так и при внезапных повреждениях, например порез валков при прокатке. В последнем случае распределение стойкости валков представляет собой суперпозицию распределений (1) с различными S и λ ($q \to C$):

$$f(C) = P_1 \frac{\lambda_1^{S_1} q^{S_1-1}}{(S_1-1)!} e^{-\lambda_1 q} + P_2 \frac{\lambda_1^{S_2} q^{S_2-1}}{(S_2-1)!} e^{-\lambda_2 q} + \ldots + P_k \frac{\lambda_k^{S_k} q^{S_k-1}}{(S_k-1)!} e^{-\lambda_k q}, \qquad (2)$$

где P_1, P_2, …, P_k – доля отдельных распределений, образующих итоговые распределения ($P_1+P_2+\ldots+P_k = 1$).

Рассмотрим, наряду с формулой (2), запись гамма-распределения в общем виде:

$$q(C) = \left[\lambda^S C^{S-1} / F(C)\right] e^{-\lambda C}, \qquad (3)$$

где $F(C)$ – гамма-функция от S.

Если под S и X в формуле (3) понимать средние значения соответствующих величин в формуле (2), то выражение (3) удовлетворительно аппроксимирует распределение (2). Для определения по экспериментальным данным параметров гамма-распределения (3) удобно пользоваться методом моментов, согласно которому

$$S = (\overline{C})^2 / \sigma_c^2, \quad \lambda = S / \overline{C} = \overline{C} / \sigma_q^2,$$

где $\overline{C}$ и σ_c – среднее значение и среднее квадратичное отклонение эмпирического ряда распределения C.

Исходя из знания закона распределения стойкости, можно дать определения стойкости и надежности инструмента.

Стойкость деформирующего инструмента – это количество изготовленных изделий требуемого качества в условиях нормального функционирования инструмента при заданной вероятности выхода его из строя:

$$N = \int_0^C q(C)dC .$$

Надежность деформирующего инструмента – это вероятность функционирования при выполнении программы производства M

$$R = 1 - \int_0^M q(C)dC .$$

Единицы измерения стойкости инструмента различаются по видам обработки металлов давлением. Так, стойкость инструмента при прессовании определяется количеством прессовок; при прокатке и волочении – весовыми или линейными единицами; при горячей/холодной штамповке – количеством штампоударов. В некоторых случаях в качестве меры стойкости используется время работы инструмента.

1.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ФАКТОРЫ РАЗРУШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Основными видами разрушения инструмента являются необратимые деформации, разгарные трещины и износ. Все перечисленные виды в большей или меньшей степени взаимодействуют друг с другом в процессе разрушения инструмента. Однако для каждого конкретного типа инструмента, для отдельных элементов деформирующей поверхности выделяют в качестве преобладающего один из перечисленных видов разрушений. Преобладание одного вида разрушения над другим зависит от взаимодействия множества факторов.

До сих пор не существует единого мнения относительно характера и значимости влияния различных факторов на виды разрушения инструмента в процессе его изготовления и эксплуатации [44, 36]. Б. Ф. Трахтенберг все факторы, влияющие на стойкость инструмента, делит на четыре группы: металлургические, технологические, конструктивные и эксплуатационные [3]. К группе *металлургических* факторов относится химический состав материала, инструмента и способ изготовления заготовки для инструмента. *Конструктивные* факторы включают метод деформирования, размеры и форму инструмента. *К технологическим* факторам относят способы изготовления, термической обработки, упрочнения и т. д. *Эксплуатационные* факторы включают температуру деформирования, степень деформации, вид смазки, условия подогрева инструмента и т. д.

С. А. Довнар [14] на основе производственного опыта все доминирующие факторы, влияющие на стойкость, представил в виде схемы (рис. 5). Кроме того, следует отметить влияние таких субъективных факторов, как культура производства, квалификация рабочих, соблюдение ими технологических инструкций.

Многообразие факторов, действующих в процессе эксплуатации инструмента, осложненное их взаимодействием, не поддающимся теоретическому анализу, и отсутствие достаточных экспериментальных данных об условиях работы инструмента затрудняет разработку эффективных мероприятий по повышению его стойкости.



Рис. 5. Схема доминирующих факторов разрушения инструмента

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ОТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Стойкость инструмента зависит от совместного действия большого числа факторов. Случайный характер их изменения обусловливает многообразие причин выхода инструмента из строя и значительные колебания в величине стойкости. Изучение эмпирических рядов стойкости инструмента (см. рис. 4) показывает, что долговечность инструмента следует рассматривать как статистическую величину, представляющую собой результат действия множества факторов, влияние каждого из которых намного перекрывается суммарным влиянием всех остальных.

Статистические исследования разрушения инструмента на основе изучения рассеивания позволяют с высокой достоверностью выделить наиболее вероятные факторы стойкости и надежности инструмента. Для этой цели используют *теорию корреляции,* т. е. такую связь, при которой с изменением одной случайной величины получается определенное распределение вероятностей другой величины. Отыскание уравнения этой связи и является первой основной задачей теории корреляции. Второй задачей является определение тесноты корреляционной связи, т. е. степени близости ее к функциональной.

Корреляционные уравнения дают возможность вычислить вероятностные значения одной случайной величины в зависимости от отдельных значений других случайных величин. Вычисление вероятностных значений по корреляционным уравнениям имеет большую практическую ценность для тех случаев, когда непосредственное определение изучаемого признака сопряжено с порчей инструмента или со значительной трудностью испытания.

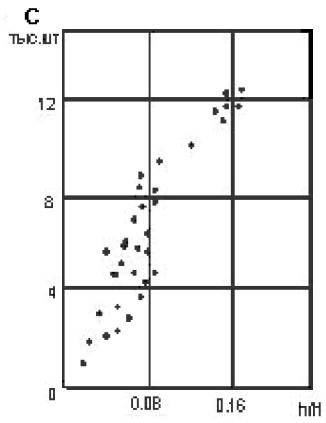


Рис. 6. Отношения высоты облойного мостика h к высоте облойной канавки H

Основным способом вычисления коэффициентов корреляционных уравнений является способ наименьших квадратов. Пусть искомое корреляционное уравнение приведено к линейному виду $C = a + bx$, где a и b – неизвестные параметры. Найдем прямую, которая подходила бы к заданным на границе точкам j ближе любой другой прямой:

$$C_j \approx a + bx_j \,(j = 1, n). \qquad (4)$$

Коэффициенты a и b отыскивают из условия, что сумма квадратов разностей между левой и правой частями приближенного уравнения (4) обращается в минимум, т. е.

$$f = \sum_{j=1}^{n}\left[C_j - (a + bx_j)\right]^2 \Rightarrow \min.$$

Значения a и b, удовлетворяющие минимуму функции, определяются из уравнений

$$\frac{df}{da} = 0 \text{ и } \frac{df}{db} = 0.$$

Произведя соответствующие выкладки, получаем систему двух уравнений первой степени относительно неизвестных a и b:

$$\sum_{j=1}^{n} C_j = na + b\sum_{j=1}^{n} x_j,$$

$$\sum_{j=1}^{n} C_j x_j = a\sum_{j=1}^{n} x_j + b\sum_{j=1}^{n} x_j{}^2.$$

Аналогично вычисляются коэффициенты корреляционных уравнений степенного $C = ax^b$, показательного $C = ab^x$, логарифмического $C = a + b\lg x$ и периодического вида: $C = a = \sum_{k=1}^{m}\left(a_k \cos kx + b_k \sin kx\right)$.

Для численного выражения степени тесноты связи между случайными величинами $x = h/H$ и C (рис. 6) используется коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0)(C_i - C_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_0)^2 \sum_{i=1}^{n}(C_i - C_0)}}, \quad \text{где } x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}.$$

В случае линейной зависимости между x и C коэффициент $r = \pm 1$, при полном отсутствии связи $r = 0$.

При решении вопроса: будет ли вычисленный коэффициент корреляции r указывать на какую-либо корреляцию между x и C, применяется критерий Стьюдента

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}}\sqrt{n - 2},$$

откуда $$|r| = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}}. \qquad (5)$$

Значения t находят из таблиц, согласно принятому уровню значимости и числу степеней свободы $f = n - 2$ [7]. Если полученное по уравнению (5) значение r будет меньше расчетного, то можно утверждать наличие зависимости между случайными переменными x и C.

При исследовании более двух случайных величин применяется метод математической статистики, называемый *множественной корреляцией.* Особенность и преимущества этого метода заключаются в том, что его применение не требует проведения специальных лабораторных исследований, когда в целях изучения влияния одного фактора стремятся остальные факторы оставить без изменения. Для применения метода множественной корреляции вариация многочисленных факторов не представляет какой-либо трудности, поэтому указанный метод является наиболее эффективной формой исследования закономерностей разрушения инструмента в реальных, производственных условиях.

Для определения совместного влияния факторов вычисляют коэффициент множественной корреляции

$$R = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{10} \\ r_{22} & 1 & r_{23} & \dots & r_{20} \\ . & . & . & \dots & . \\ r_{10} & r_{20} & r_{30} & \dots & 0 \\ 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1k} \\ r_{22} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2k} \\ . & . & . & \dots & . \\ r_{1k} & r_{2k} & r_{3k} & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

Здесь индексы от «1» до k означают параметры инструмента, а индекс «0» – стойкость (например, r_{10} – коэффициент корреляции со стойкостью первого параметра).

Матрицы решаются согласно правилам линейной алгебры. Отсюда следует, что для двух переменных x_1 и x_2 коэффициент R рассчитывается по формуле

$$R = \sqrt{\frac{r^2_{10} + r^2_{20} - 2r_{10}r_{20}r_{12}}{1 - r^2_{12}}}.$$

При независимых переменных, т. е. при $r_{12} = 0$

$$R = \sqrt{r^2_{10} + r^2_{20}}$$

По этой же формуле подсчитывается R_i в том случае, когда имеется R_{i-1} для $i - 1$ параметров и необходимо найти R_t при включении i-го параметра, теснота связи которого r_{10}:

$$R_i = \sqrt{R^2_{i-1} + r^2_{20}}$$

Стойкостные испытания инструмента являются весьма трудоемкими. Они требуют больших затрат времени, значительных материальных затрат на изготовление инструмента и на материал для проведения эксперимента. Поэтому весьма актуальным является расчет стойкости на основе метода планирования многофакторного эксперимента [6].



Рис. 7. Блок-схема эксплуатации штампа в процессе горячей штамповки

Поставленная задача решается на основе представления о кибернетической системе, которую называют *«чёрным ящиком»* (рис. 7). Он представляет собой систему связей, недоступную для наблюдения, так как о содержании, механизме процесса нам ничего не известно или известно лишь частично: известны только входы, пере-

менные x, участвующие в процессе (факторы), и выходы – результат процесса (параметр оптимизации), обозначенный символом y.

Каждый фактор может принимать в опыте одно или несколько значений. Такие значения называются *уровнями.* Схема «черного ящика» позволяет строить математические уравнения, связывающие параметр оптимизации с факторами: $y = f(x_1, x_2, \ldots \ldots, X_k)$. Задача эксперимента состоит в том, чтобы определить численные значения коэффициентов этого уравнения. Обычно функцию $f(x_1, x_2, .., x_k)$ выбирают в виде степенного ряда. В частности, для двух факторов функция имеет вид полиномов первой степени $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$; с неполным квадратным членом: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$

Модель должна быть достаточно точной, т. е. близкой к фактической зависимости. Тогда считают, что она адекватна.

При планировании по схеме полного факторного эксперимента реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Необходимое количество опытов N при полном факторном эксперименте определяется по формуле $N = p^k$, где p – количество уровней; k – число факторов.

Если эксперименты проводятся на двух уровнях, то постановка опытов по такому плану называется *полным факторным экспериментом* типа 2^k. Каждый фактор, участвующий в процессе, имеет определенный предел изменения своей величины. Совокупность всех значений, которые принимает фактор, называется *областью определения фактора.* Но в области определения надо найти локальную подобласть для планирования эксперимента, т. е. для каждого фактора необходимо указать тот интервал изменения параметров, в пределах которого проводятся исследования. Для этого на основании априорной информации устанавливают ориентировочно значения факторов, комбинации которых дают наилучший результат. Этой комбинации значений факторов соответствует многомерная точка в факторном пространстве, которую принимают за исходную при построений плана эксперимента. Координаты этой точки называются *основными уровнями факторов.*

После того как основной уровень выбран, переходят к следующему шагу – выбору интервалов варьирования. *Интервалом варьирования фактора* называется некоторое число, прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровень фактора.

Поскольку факторы изучаемого процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, их следует привести к единой системе исчисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным по формуле $x_j = \frac{x_j - x_{0j}}{\Delta x_j}$, где x_j – кодированное значение фактора; x_j – натуральное значение фактора; x_{0j} – натуральное значение фактора на основном уровне; j – номер фактора; Δx_j – интервал варьирования.

В безразмерной системе координат верхний уровень равен «+1», нижний, соответственно, «–1», координаты основного уровня равны нулю. Для случая $N = 2^2$ условия проведения эксперимента записывают в виде таблицы, которую называют *матрицей планирования эксперимента* (табл. 1.1).

Построение матриц планирования основано на правиле чередования знаков: в первом столбце они меняются поочередно, во втором чередуются через два, в третьем – через четыре и т. д., по степеням двойки.

Таблица 1.1. **Матрица планирования эксперимента 2^2**

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	y
1	+	–	–	y_1
2	+	+	–	y_2
3	+	–	+	y_3
4	+	+	+	y_4

По результатам эксперимента определяются коэффициенты математической модели:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_{ij} x_i}{N} \qquad (6)$$

Чтобы привести процедуру вычисления коэффициента b_0 в соответствие с формулой (6), в матрицу планирования введем столбец фиктивной x_0, которая во всех опытах принимает значение «+1». Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента b_j, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак «+», то с увеличением значения фактора y исследуемый параметр увеличивается, а если «–», то уменьшается.

Планируя эксперимент, мы стремимся получить линейную модель, однако у нас нет уверенности в том, что в выбранных интервалах варьирования процесс описывается линейной моделью. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, что эффект (влияние) одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия. Для этого следует, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов (табл. 1.2).

Таблица 1.2. **Матрица планирования эксперимента 2^2 с эффектом взаимодействия**

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1, x_2 (x_3)$	y
1	+	–	–	+	y_1
2	+	+	–	–	y_2
3	+	–	+	–	y_3
4	+	+	+	+	y_4

Математическая модель выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2$$

Коэффициент b_{12} вычисляется аналогично по формуле (2). Каждый эксперимент содержит элемент неопределенности вследствие ограниченности информации. Параллельные опыты не дают полностью совпадающих результатов, потому что всегда существует ошибка опыта (ошибка воспроизводимости). Для ее определения опыт воспроизводится по возможности в одинаковых условиях несколько раз, а затем берется среднее арифметическое всех результатов: $\overline{y} = (y_1 + y_2 + ... + y_n)/n$, где n – число параллельных опытов. Отклонение результата любого опыта от среднего арифметического можно представить как разность $(y_q - \overline{y})$, где y_q – результат отдельного опыта. Наличие отклонений свидетельствует об изменении значений, полученных при повторных опытах. Для измерения этого различия чаще всего используют дисперсию опыта, описываемую уравнением

$$S_{y^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_q - \overline{y})^2}{f^2},$$

где f – число степеней свободы – понятие, учитывающее в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Значение f подсчитывается как разность между числом выполненных опытов и числом констант (коэффициентов, средних и т. д.), подсчитанных по результатам тех же опытов. В данном случае $f = n - 1$, так как на вычисление y расходуется одна степень свободы.

Для расчета S_y^2 опыты, заданные матрицей планирования, дублируют n раз и подсчитывают построчные дисперсии:

$$S_{yi^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{il} - \overline{y_i})^2}{n-1},$$

где y_{il} – результат параметра оптимизации l-го повторения i-го опыта,

$\bar{y}_i$ – среднее арифметическое значение всех повторений i-го опыта,

$$S_{y^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S^2_{yi}}{N},$$

т. е. ставится серия одинаковых опытов n, затем проверяется однородность дисперсий, т. е. выясняется; определяются ли различные значения y с одинаковой точностью по критерию Кохрена:

$$\varsigma_{\text{расч}} = \frac{S^2_{y\max}}{\sum_{i=1}^{n} S^2_{yi}}.$$

Расчетное значение ς-критерия сравнивают с табличным в зависимости от уровня значимости α, числа степеней свободы $t = n - 1$ и числа опытов N [7]. Ряд дисперсий считается однородным, если $\varsigma_{\text{расч}} < \varsigma_{\text{табл}}$.

Уровень значимости α – мера точности ответа. Для инженерных расчетов подходящим является $\alpha = 0{,}05$, что соответствует вероятности правильного ответа: $p = 1 - \alpha = 0{,}95$ или 95%. При этом считают, что в среднем в 5% случаев возможна ошибка.

Коэффициенты модели b_j – считаются значимыми, когда их абсолютная величина больше доверительного интервала, где t – критерий Стьюдента (берется из таблиц в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы при определении дисперсии опыта [7]), S_b - среднеквадратичная ошибка определения коэффициентов регрессии, $S_{bi}^2 = S_y^2/hN$ – дисперсия в определении коэффициентов.

Статистическая незначимость коэффициента интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего фактора в изученных интервалах его измерения. Такие коэффициенты из модели исключаются.

Адекватность модели проверяют с помощью критерия Фишера:

$$F_{f_2 f_1} = S^2_{\text{неад}} / S_{y^2},$$

где $S^2_{\text{неад}}$ – дисперсия неадекватности

$$S^2_{\text{неад}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{i\text{расч}} - y_{i\text{эксп}})^2}{N - k}.$$

Здесь $y_{i\text{расч}}$, $y_{i\text{эксп}}$ – значения параметра оптимизации в i-м опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и определенные экспериментально, k – число коэффициентов уравнения регрессии, включая b_0.

Гипотеза об адекватности уравнения принимается в том случае, когда рассчитанное значение F-критерия не превышает табличного для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы f_1 и f_2, с которыми определялись дисперсии неадекватности и опыта [7], т.е. $F_{\text{расч}} \le F_{\text{табл}}$.

Контрольные вопросы

1. Почему значение средней стойкости не является достаточной оценкой стойкости инструмента?

2. Какой инструмент из двух, в случае равенства среднего значения стойкости, качественнее? С большим или меньшим значением стойкости?

3. В каком случае действует закон «трех сигм» при определении максимального и гарантированного значения стойкости?

4. Что означает несимметричность эмпирического закона распределения стойкости?

5. Методика построения эмпирического закона распределения стойкости инструмента в производственных условиях.

6. Способы проверки эмпирического закона распределения стойкости на нормальность.

7. Почему стойкость инструмента является случайной величиной?

8. Особенности корреляционного анализа стойкости.

9. Как оценить надежность деформирующего инструмента?

10. Основные группы факторов, влияющие на стойкость инструмента.

11. Основные факторы разрушения инструмента.

12. Моделирование эксперимента и матрицы планирования эксперимента при прогнозировании стойкости эксперимента.

13. Значение эмпирического коэффициента и его проверка на значимость.

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 1

1.1. Определить вероятность безотказной работы инструмента, если было испытано 9 однотипных волок, из них две волоки вышли из строя в течение трех смен.

1.2. Найти время безотказной работы штампа с вероятностью 0,9; если стойкость инструмента подчиняется нормальному закону распределения.

1.3. Для рабочих втулок контейнеров одинаковой конфигурации получены следующие двадцать пять значений стойкости в тысячах прессовок: 4,1; 9,8; 20,5; 8,1; 15,3; 17,6; 6,6; 9,3; 11,7; 13,4; 14,8; 12,3; 6,9; 7,2; 5,5; 8,8; 9,7; 7,6; 10,4; 10,9; 11,5; 32,8; 16,2; 17,1; 18,7.

1) Построить гистограмму для этого распределения.

2) Проверить нормальность распределения с помощью вероятностной бумаги.

3) Если будет получено соответствие нормальному закону распределения, найти среднюю, гарантированную и максимальную стойкости рабочих втулок контейнера.

1.4. Построить корреляционное уравнение, связывающее среднюю стойкость штампов для поковок с удлиненной осью и отрост-

ками с весом поковок в *кг*, если в результате наблюдения были получены данные (табл. 1.3).

Таблица 1.3. **Средняя стойкость штампов в зависимости от веса поковок**

Вес поковки, *кг*	1	2	3	4	5	6	8	10
Средняя стойкость, *шт.*	4500	3600	3000	2800	2600	2400	2200	2100

1.5. При условии, что распределение стойкости волок является нормальным, среднее значение стойкости равно 520 *т*, а дисперсия 25 *т*. Определите в процентах число волок, попадающих в интервал: а) 520 *т* ± 25 *т*; б) больший, чем 600 *т*; в) равный 520 *т*, – если было испытано 60 волок.

1.6. Используя вероятностную бумагу, определите, описываются ли следующие данные по стойкости деформирующего инструмента нормальным распределением (табл. 1.4).

Таблица 1.4. **Эмпирические данные по стойкости инструмента**

Молотовые штампы		Штампы КГШП		Штампы ГКМ		Иглы для прессования	
тыс. поковок	n_i, шт.	тыс. поковок	n_i, шт.	тыс. поковок	n_i, шт.	кол-во прессовок	n_i, шт.
2,85–3,45	1	1,3–2,1	3	1,4–2,4	7	15–30	4
3,45–4,05	2	2,1–2,9	5	2,4–3,4	11	30–45	6
4,05–4,65	3	2,9–3,7	21	3,4–4,4	20	45–60	20
4,65–5,25	5	3,7–4,5	41	4,4–5,4	26	60–75	15
5,25–5,85	6	4,5–5,3	54	5,4–6,4	25	75–90	9
5,85–6,45	54	5,3–6,1	40	6,4–7,4	16	90–105	3
6,45–7,05	40	6,1–6,9	9	7,4–8,4	9	–	–
7,05–7,65	9	6,9–7,7	3	8,4–9,4	6	–	–

1.7. На следующих графиках (рис. 8) представлены типичные экспериментальные наблюдения за работой инструмента. Рассматривая каждую из диаграмм, грубо оцените коэффициент корреляции и сделайте выводы.

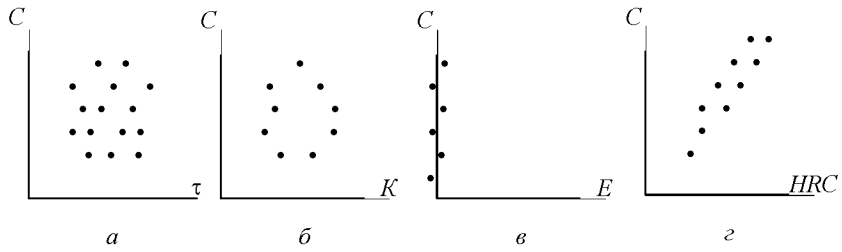


Рис. 8. Поля корреляции стойкости инструмента в зависимости от времени года τ (*а*), квалификации рабочих К (*б*), модуля Юнга Е (*в*), твердости материала HRC (*г*)

1.8. Установите наличие корреляционной связи между стойкостью молотовых штампов C и массой поковок G, исходя из опытных данных, полученных за некоторый период времени и сведенных в табл. 1.5.

1. Представить полученные данные графически.
2. Вычислить коэффициент корреляции r.
3. Установить наличие корреляционной связи при $\alpha = 0{,}05$.
4. Определить коэффициент A и m зависимости $C_i = A/G_i^m$.

Таблица 1.5. **Стойкость штампов в зависимости от массы поковок**

G_i, *кг*	2,4	2,5	2,8	3,5	4,5	4,9	5,7	5,8	10,0	10,0	10,0	12,0	16,0	18,0
C, *тыс. шт.*	2,2	3,6	3,3	3,5	2,7	4,8	4,3	3,2	4,8	5,7	7,0	3,9	6,0	5,8

1.9. Значения стойкости штампов из стали марки 5ХНТ в зависимости от массы падающих частей молота при штамповке конструкционных сталей характеризуются следующими цифрами, приведенными в табл. 1.6.

Построить уравнение, связывающее среднюю стойкость штампов с массой падающих частей.

Таблица 1.6. **Зависимость стойкости штампов от массы падающих частей молота**

Масса падающих частей, *m*	Стойкость, количество поковок
0,6	6500–14500
1	6000–12000
2	5000–9500
3	4100–7500
4	3400–6500
6	2300–4500
8	1400–3200
10	1000–2300

2. РАЗГАРНЫЕ ТРЕЩИНЫ

2.1. ПРИРОДА ОБРАЗОВАНИЯ РАЗГАРНЫХ ТРЕЩИН

На основе данных рис. 9 в процессе теплопередачи можно выделить следующие этапы:

– отсутствие непосредственного контакта – теплопередача происходит в основном за счет излучения (участок *а*);

– контакт при наложении заготовки на инструмент – давление минимально, теплопередача при большом термическом сопротивлении контактного слоя незначительная (участок *б*);

– контакт при воздействии деформирующего усилия на заготовку – термическое сопротивление контактного слоя минимально, инструмент нагревается в основном за счет теплопроводности (участок *в*);

– контакт при снятии деформирующего усилия – термическое сопротивление возрастает, теплопередача происходит менее интенсивно (участок *г*);

– промежуток между снятием поковки и наложением следующей заготовки – теплопередача идет в окружающую среду за счет излучения и конвекции (участок *д*).

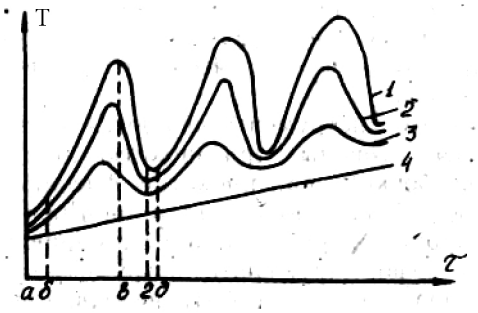


Рис. 9. Типичные температурные кривые в штампе на различной глубине от поверхности гравюры (точки 1–4 расположены равномерно по мере удаления от поверхности гравюры)

Анализ температурных кривых показывает значительные колебания температуры в поверхностных слоях инструмента. По мере

удаления от поверхности амплитуда колебаний быстро уменьшается. Периодическое изменение температуры приводит к распространению в инструменте тепловых волн и соответствующих им температурных напряжений. Пусть на рис. 9 плоскость $x = 0$ является поверхностью контакта горячего металла с инструментом. Уравнение теплопроводности для данного случая имеет вид

$$\partial T / \partial \tau = a - (\partial^2 T / \partial x^2) . \qquad (7)$$

Граничные условия, соответствующие периодическому нагреву и охлаждению поверхности инструмента, можно представить в виде

$$T = T_a \sin \omega \tau + T_0 \qquad x = 0$$
$$T = T_0 \qquad x = \infty , \qquad (8)$$

где T_a – амплитуда колебаний температуры в плоскости контакта,

T_0 – средняя установившаяся температура инструмента,

$\omega = 2\pi / \tau_0$ – частота колебаний температуры,

τ_0 – период колебаний температуры.



Рис. 10. Схема распределения температур в заготовке и инструменте в процессе горячей деформации: сплошные линии – при отсутствии промежуточного слоя, штриховые – при наличии промежуточного теплоизоляционного слоя

При достаточно большом τ процесс распространения температурных волн становится установившимся. Соответствующее этому состоянию решение уравнения (7), отвечающее граничным условиям (8), в толще инструмента будет

$$T = T_0 \exp\left(-x\sqrt{\pi / a\tau_0}\right).$$

Из формулы видно, что амплитуда температурных колебаний по мере увеличения расстояний от плоскости контакта быстро затухает (рис. 11), причем каждая отдельная волна распространяется вглубь с неизменным периодам. Тепловые волны приводят к образованию и развитию разгарных трещин. Если волны короткие, то распространение трещин вглубь инструмента будет ограниченным. Длинные волны вызывают развитие трещин на большие расстояния от поверхности инструмента, поскольку при пробеге длинной волны возникают высокие температурные напряжения, способные даже самостоятельно, а тем более в сочетании с напряжениями от внешнего нагружения, привести инструмент к поломке.

Глубина заметного проникновения тепловых волн в массивном теле, в зависимости от периода колебаний температуры, определяется по формуле $x = 2{,}6\sqrt{a\tau}$, где a – коэффициент теплопроводности.

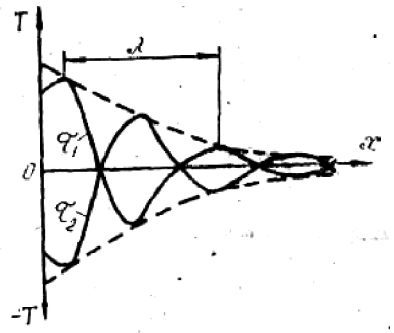


Рис. 11. Распространение тепловых волн в полуограниченном теле в различные моменты времени

Чем больше теплопроводность материала инструмента, тем на большую глубину распространяется влияние тепловых волн.

Физику процесса образования разгарных трещин [14] легко можно понять, рассмотрев модель упругого вязко-пластического тела (рис. 12). Пусть эта модель состоит из множества элементарных систем, связанных между собой посредством упругих пластин, по искривлению которых можно судить о закономерностях развития остаточных напряжений 1-го рода. Такая система состоит из термоэлемента, механизма зацепления, устройства вязкого течения и пружины, работа которых, соответственно, имитирует процессы теплового расширения, сдвига по кристаллографическим плоскостям, вязкого течения зерен и действие сил упругости.

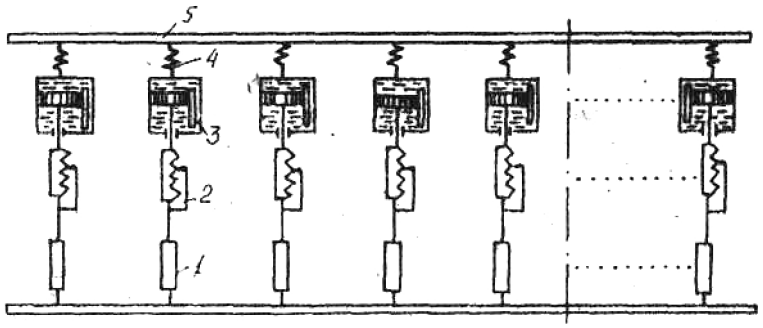


Рис. 12. Механическая модель вязкопластичного тела: *1* – термоэлемент, *2* – механизм зацепления, *3* – устройство вязкого течения, *4* – пружина, *5* – упругие пластины

При возникновении теплового потока, например, с боковой поверхности модели, элементарные системы нагреваются по закону бегущей волны. В результате теплового расширения термоэлементов пружины начинают сжиматься, жидкость переходит из одной половины цилиндра в другую, а по достижении критической нагрузки поочередно срабатывают механизмы зацепления. При изменении направления теплового потока боковое системы могут вернуться в исходное состояние, но этому препятствуют другие элементы, связанные посредством упругой пружины. Одни элемен-

тарные системы будут находиться в сжатом состоянии, другие - в растянутом, и только некоторая часть элементарных систем не будет подвержена силовому воздействию упругой пластины *1*.

Аналогичные явления происходят и в металле инструмента. Неоднократный нагрев и охлаждение рабочей поверхности вызывают термическую усталость. При контакте с горячей заготовкой рабочая поверхность инструмента быстро нагревается. Прилегающие менее нагретые слои препятствуют термическому расширению горячего поверхностного слоя, в котором возникают сжимающие напряжения. При охлаждении инструмента напряжения меняют знак, тогда в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения. Периодические растягивающие напряжения и вызывают разрушение инструмента в виде разгарных трещин.

2.2. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ИНСТРУМЕНТА

Под температурным полем инструмента понимается совокупность мгновенных значений температуры во всех его точках. Температурное поле является важнейшим фактором, предопределяющим разрушение инструмента. Нагрев до температур превышающих температуры отпуска, приводит к снижению прочностных свойств инструмента, что в сочетании с возникающими вследствие температурных градиентов и мартенситного превращения термическими и фазовыми напряжениями обусловливает смятие формообразующих участков, появление трещин и выход инструмента из строя. Вызванные разогревом температурные деформации могут приводить к изменению размеров формообразующих участков за пределы поля допуска. Поэтому проблеме определения и регулирования температуры в инструменте придается огромное значение. Что же определяет температурное поле инструмента?

1. В процессах горячей и холодной обработки металлов давлением работа пластической деформации превращается в тепловую энергию, что приводит к соответственному повышению температуры заготовки и инструмента.

Повышение температуры заготовки объемом V за счет пластичной деформации можно определить по формуле:

$$\Delta T = k(A / Ic\gamma V),$$

где A – работа пластической деформации, $A = \iiint \sigma_i \varepsilon_i dV$; k – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в тепло (k = 0,75…0,9 для холодной деформации и k =1,0 для горячей деформации); I – механический эквивалент теплоты, I = 427 *кгм/ккал*; c – теплоемкость; γ – удельный вес; σ_i – интенсивность напряжений; ε_i – интенсивность деформаций.

2. На поверхностях контакта деформируемого металла и инструмента происходит превращение работы сил трения в тепло и теплообмен, соответственно повышается температура – это оказывает существенное влияние на стойкость инструмента.

Найдем закономерности повышения температуры движущегося металла вследствие трения и теплопередачи. Для этого рассмотрим элемент металла длиной dS и толщиной δ, расположенный на расстоянии S от начальной точки O линии контакта (рис. 13).

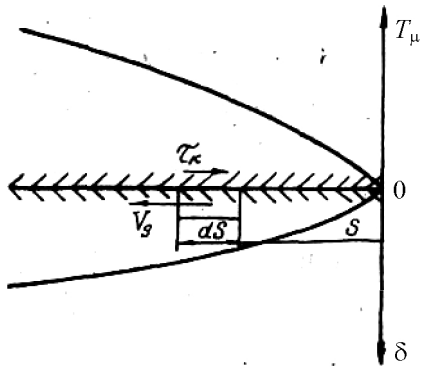


Рис. 13. Движение элемента металла вдоль линии контакта

Если пренебречь распространением тепла вследствие теплопроводности вдоль движения металла, то при установившемся распределении температуры поток тепла в движущемся элементе в

направлении нормали к поверхности контакта, в соответствии с законом Фурье, является стационарным и одномерным:

$$q_{\mu} = (\lambda / \delta) T_{\mu}, \tag{9}$$

где T_{μ} – повышение температуры вследствие превращения работы трения в тепло; q_{μ} – количество тепла, выделяющееся в результате трения; λ – коэффициент теплопроводности.

Тепловой поток, возникающий вследствие трения:

$$q_{\mu} = \tau_k \upsilon_s, \tag{10}$$

υ_S – скорость движения металла по контактной поверхности;

τ_k – напряжение трения, $\tau_k = \mu 2k$,

k – пластическая постоянная.

Из уравнений (9) и (10) находим

$$T_{\mu} = \frac{\mu 2k\upsilon_s}{\lambda}\delta, \tag{11}$$

Используя линейность соотношения (11), можно установить зависимость между количеством тепла, выделенным вследствие трения, и изменением температуры слоя:

$$\mu 2kSdS = \delta dSc\rho\frac{T_{\mu}}{2},$$

откуда

$$T_{\mu} = \frac{4\mu kS}{c\rho\delta}. \tag{12}$$

Исключая из уравнений (11) и (12) толщину слоя, найдем распределение T_{μ} вдоль линии контакта:

$$T_{\mu} = \mu 2k\sqrt{\frac{2\upsilon_s S}{\lambda c\rho}}.$$

Из уравнений (11) и (12) находим выражение для толщины слоя δ, в котором температура повышается из-за превращения работы контактного трения в тепло:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\lambda S}{c\rho\upsilon_s}}\,.$$

На рис. 13 показаны кривые изменения температуры и толщины нагретого слоя вдоль линии контакта.

3. При горячей деформации нагретая заготовка соприкасается, как правило, с более холодным инструментом. Несмотря на малую продолжительность времени контакта, происходит подстывание тонкого приконтактного слоя деформируемого металла. Оно вызывает значительное повышение уровня механических свойств металла (в два–три раза). Одновременно происходит разогрев контактной поверхности инструмента, снижение его твердости и прочности в результате повышения температуры. На рис. 9 приведена качественная картина распределения температур в приконтактных слоях деформируемого металла и инструмента.

Повышение уровня механических свойств приконтактного слоя деформируемого металла затрудняет деформацию последнего вследствие значительного возрастания нормальных и касательных напряжений. Рост контактных напряжений при одновременном снижении механических свойств металла инструмента вызывает его преждевременное разрушение.

Определим распределение температуры в любой момент времени вблизи контактной поверхности между нагретой заготовкой и инструментом. Для упрощения решения задачи в реальных условиях обычно принимают следующие допущения: размеры заготовки и инструмента в направлении осей z и j предполагаются достаточно большими; передача тепла от заготовки к инструменту за время контакта между ними осуществляется лишь теплопроводностью, тепло протекает только в направлении, нормальном к поверхности контакта. Поэтому можно считать, что распределение температуры в процессе охлаждения заготовки $T_з$ и нагревания инструмента $T_и$ зависит только от координаты x и времени τ.

Уравнение теплопроводности для данного случая имеет вид

$$\frac{dT_з}{d\tau} = a_з \frac{d^2T_з}{dx^2} \qquad \infty > x \geq 0;$$

$$\frac{dT_и}{d\tau} = a_и \frac{d^2T_и}{dx^2} \qquad -\infty < x \leq 0. \qquad (13)$$

где $a_з$ и $a_и$ – коэффициенты температуропроводности заготовки и инструмента, характеризующие скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности

$$a_{з(и)} = \lambda / c\gamma .$$

Начальные температуры горячей заготовки и инструмента соответственно $T_з(x, 0) = T_{0з}$, $T_и(x, 0) = T_{0и}$. Температуру предварительного подогрева $T_{0и}$ выбирают в зависимости от материала инструмента и температуры деформируемого металла. Вследствие плотного прилегания на линии контакта температуры наружной поверхности заготовки и инструмента равны и тепловой поток непрерывен:

$$T_з(0,\tau) = T_и(0,\tau) = T(0,\tau);$$
$$\lambda_з \frac{dT_з(x,\tau)}{dx} = \lambda_и \frac{dT_и(x,\tau)}{dx} \qquad (14)$$

Здесь индексы «з», «и» относятся соответственно к заготовке и инструменту. Уравнениям теплопроводности (13) удовлетворяют решения типа

$$T_з(x,\tau) = A_з + B_з \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_з \tau}}\right);$$

$$T_и(x,\tau) = A_и + B_и \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_и \tau}}\right),$$

где $\Phi(u) = 2/\sqrt{\pi} l - \xi^2 d\xi$ интеграл, называемый функцией Гаусса, значения которой табулированы [7];

$A_з$, $B_з$, $A_и$, $B_и$, - константы, значения которых легко определить из граничных условий (14).

$$A_з = A_и = \frac{T_{0з}\lambda_з\sqrt{a_и} = T_{0и}\lambda_и\sqrt{a_з}}{\lambda_з\sqrt{a_и} + \lambda_и\sqrt{a_з}};$$

$$B_з = \frac{\lambda_з\sqrt{a_и}}{\lambda_з\sqrt{a_и} + \lambda_и\sqrt{a_з}}(T_{0з} - T_{0и});$$

$$B_и = \frac{\lambda_и\sqrt{a_з}}{\lambda_з\sqrt{a_и} + \lambda_и\sqrt{a_з}}(T_{0з} - T_{0и}).$$

При $x = 0$ получим температуру поверхности инструмента:

$$T_з = T_и = T = \frac{c_\lambda T_{0з} + T_{0и}}{1 + c_\lambda},$$

где

$$c_\lambda = \frac{\lambda_з\sqrt{a_и}}{\lambda_и\sqrt{a_з}}$$

Используя принцип суперпозиции температурных полей, можно определить суммарное температурное поле, возникающее в инструменте вследствие превращения работы пластической деформации и сил трения в тепло при теплообмене между нагретой заготовкой и инструментом. Важнейшие параметры, с помощью которых можно регулировать температурное поле инструмента во время его функционирования: начальные температуры заготовки и инструмента, теплофизические свойства контактирующих материалов, время и скорость пластической деформации, темп деформирования, микрорельеф, контактное давление, смазка и т. д.

Основой для теплотехнических расчетов режимов регулирования может служить закон Ньютона. В соответствии с этим законом количество теплоты, передаваемое в единицу времени с единицы поверхности тела в окружающую среду, прямо пропорционально перепаду температур между поверхностью тела $T_п$ и окружающей средой $T_с$, т. е. $q_п(\tau) = \alpha[T_п(\tau) - T_с]$, где α – коэффициент теплопередачи, зависящий от природы охлаждающей среды, скорости ее перемещения и формы охлаждающего тела.

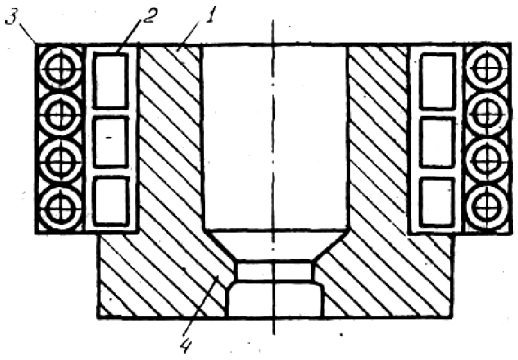


Рис. 14. Штамп для выдавливания: *1* – контейнер, *2* – матрица, *3* – нагревательный элемент, *4* – охлаждающий элемент

Температурное поле штампа для выдавливания клапанов, который в качестве примера приведен на рис. 14, регулируют методом попеременного включения размещенных внутри штампа нагревающих и охлаждающих элементов.

2.3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА

Первым непременным условием разрушения элементарной модели тела является образование при ее нагреве сжимающего напряжения σ_p, способного привести в действие устройство вязкого течения. В первом приближении [14] $\sigma_p \cong \alpha E_t \Delta t$, где α – коэффициент теплового расширения; E_t – модуль упругости при верхней температуре цикла; Δt – температурный размах цикла. При этом с понижением предела текучести материала при верхней температуре цикла σ_{mt} степень необратимого сжатия элементарных систем ε_p, например, за счет вязкого течения, увеличивается, следовательно, $\varepsilon_p \sim \sigma_p / \sigma_{Tt}$.

Вторым условием разрушения элементарной системы является наличие на стадии охлаждения высоких растягивающих напряжений. Необходимо, чтобы механизм зацепления по мере понижения

температуры непрерывно увеличивал сопротивление сдвигу. Ясно, что чем выше сопротивление сдвигу, тем вероятней разрушение механизма зацепления или устройства вязкого течения. Растягивающие напряжения σ будут тем больше, чем больше разность пределов текучести материала $\Delta\sigma_T$, предопределяемая температурным размахом цикла, т. е. $\sigma \sim \Delta\sigma_T$.

Поскольку $A_{\text{ц}} \sim \varepsilon_p \sigma$, то работа пластической деформации за цикл при установившемся режиме работы инструмента оказывается пропорциональной:

$$A_{\text{ц}} \sim \frac{\alpha E_t \Delta\sigma_T}{\sigma_{Tt}}$$

Поэтому расчетная формула для сравнительной оценки двух сопоставляемых материалов на склонность к образованию одинаковых по длине разгарных трещин представляется как отношение

$$\frac{N'_{\max}}{N''_{\min}} = \frac{\alpha''}{\alpha'} \frac{F_t''}{F_t'} \frac{A_{np}'}{A_{np}''} \frac{\sigma_{Tt}'}{\sigma_{Tt}''} \frac{\Delta\sigma_T''}{\Delta\sigma_T'}.$$

Контрольные вопросы

1. Природа зарождения и развития разгарных трещин.
2. Какие основные факторы нагрева инструмента в условиях эксплуатации?
3. Как распределяется температура в заготовке и инструменте в процессе горячей деформации?
4. Физика процессов на примере упруговязкопластичного тела.
5. Из чего складывается температурное поле инструмента?
6. Закономерность повышения температуры деформируемого металла вследствие трения.
7. Влияние температуры приконтактного слоя заготовки и инструмента на стойкость инструмента.
8. Как можно регулировать температурное поле инструмента в процессе обработки металлов давлением?

9. Что вызывает появление тепловых зон в инструменте?

10. Причина образования термических зон в инструменте.

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 2

2.1. Найти оптимальный режим охлаждения полого налка, обеспечивающий необходимую стойкость, предположив, что при установившемся теплообмене через цилиндрическую стенку температура по сечению распространяется соответственно логарифмическому закону:

$$T = T_2 - \frac{T_2 - T_1}{\ln K} \ln \rho,$$

где $k = R_i/R_2$; $\rho = R/R_2$; R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиусы валка соответственно; T и ρ – текущие температура и безразмерная координата точки ее определения; T_1 и T_2 – температуры на внутренней и наружной поверхности валка соответственно. Тогда термические напряжения по сечению валка могут быть вычислены по формулам:

$$\sigma_r = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2(1-\mu)\ln k}\left[\ln\rho + \frac{k^2}{1-k^2}\left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right)\ln k\right];$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2(1-\mu)\ln k}\left[1 + \ln\rho + \frac{k^2}{1-k^2}\left(1 + \frac{1}{\rho^2}\right)\ln k\right];$$

$$\sigma_z = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2(1-\mu)\ln k}\left[1 + 2\ln\rho + \frac{2k^2}{1-k^2}\ln k\right].$$

Здесь E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного расширения. В расчетах принять: R_1 = = 40 *мм*; R_2 = 200 *мм*; μ = 0,3; E = 21000 *кг/мм*^{2}; α = 12 10^{-6} 1/*град*; T_2 – T_1 = 100 °С.

2.2. Оценить влияние длительности смыкания штампов на теплопередачу во время короткого и длительного смыкания.

2.3. Рассчитать температуру контакта инструмента для исходных температуры заготовки $T_{0з}$ = 1000 °С и температуры штампа

$T_{0и}$ = 400 °С. В расчетах принять: для материала штампа $\lambda_и$ = 37 *Вт* (*м·k*) и $a_и = 6 \cdot 10^{-6}$ *м*^{2}/*с*; для материала заготовки $\lambda_з$ = 41 *Вт (м·k)* и $a_з = 7 \cdot 10^{-6}$ *м*^{2}/*с*.

2.4. Через *Т* обозначена температура подогрева ручьевых вставок КГШП. *С* – стойкость ручьевых вставок в тыс. поковок. Результаты 25 наблюдений сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. **Корреляционная таблица величин *Т* и *С***

Температура	Стойкость *С*, тыс. поковок		
Т, °С	3	6	9
20	0	2	0
200	0	4	2
400	2	9	6

Целые числа, приведенные в таблице, являются кратностями значений соответствующих случайных точек. Так, например, точка, для которой *Т* = 200 °С, *С* = 6, имеет кратность 4, т. е. в результате четырех опытов значению *Т* = 200 °С соответствовало значение С = 6 тыс. поковок.

Требуется определить коэффициент корреляции и проверить гипотезу существования связи между *С* и *Т*.

2.5. Определить толщину слоя стального рабочего валка, в котором происходит заметное колебание температур, если валок вращается со скоростью 1000 *об/мин*, *с* = 0,14 *кдж/кг · град*, ρ = 7800 *кг/м*^{3}, λ = 50 *кдж/ч м град*. Как изменится толщина слоя заметного колебания температуры, если период изменения температуры поверхности валка будет равен 3 *мин*.

3. ИЗНОС

3.1. ВИДЫ ИЗНОСА

При эксплуатации инструмента одним из основных видов разрушения является износ (изнашивание). Установлено, что 85...90% инструмента, используемого в процессах холодного деформирования, выходит из строя в результате износа и только 10...15% - по другим причинам.

Износ – процесс разрушения и отделения материала с поверхности инструмента и(или) накопление его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и(или) формы инструмента (ГОСТ 23002-78).

Задача исследования износостойкости инструмента состоит в установлении зависимостей износа от факторов, характеризующих качество поверхности инструмента, вид смазки и др. Эти зависимости позволяют оптимизировать технологию изготовления, условия эксплуатации инструмента, улучшать и прогнозировать его работоспособность.



Рис. 15. Характер изменения размеров инструмента
от количества отштампованных изделий

На рис. 15 показана характерная кривая износа, на ней можно выделить три участка. На первом участке наблюдается приработка инструмента, когда происходит истирание микронеровностей по-

верхности и следов механической обработки. С точки зрения повышения стойкости этот период целесообразно сократить за счет улучшения качества поверхности. На втором участке изменяется микрорельеф и микроструктура поверхности. Имеет место наклеп или отпуск поверхности, появляются микротрещины термической усталости, наросты, унос поверхностных слоев. Накопление этих изменений и их взаимное влияние друг на друга приводит к резкому увеличению интенсивности износа, что соответствует третьему участку на графике. Вслед за этим происходит быстрый выход инструмента из строя.

Износ связан со скольжением деформируемой заготовки по поверхности инструмента при наличии трения между ними. Как показывает практика [19], истиранию способствуют нормальные и касательные напряжения, действующие совместно или раздельно. При износе поверхность инструмента приобретает нерегулярные углубления, переходящие в следующей стадии в сетку трещин. Касательные напряжения являются причиной образования канавок, простирающихся вдоль направления течения деформируемого металла.

Согласно классификации Б. И. Костецкого [20] различают следующие виды износа:

– износ схватыванием первого рода;

– окислительный;

– тепловой или износ схватыванием второго рода;

– абразивный;

– усталостный.

Износ схватыванием первого рода – это самый тяжелый вид износа, когда деформируемый металл движется с небольшими скоростями относительно инструмента. Боуден и Тейбор считают, что износ схватыванием представляет собой процесс образования мостиков сварки и их разрушения на некоторой глубине. При этом срез мостиков происходит по менее прочному металлу, а продукты истирания оседают на более твердой поверхности.

Окислительный износ является наименее интенсивным, так как истирание инструмента при этом меньше. Поверхностный слой инструмента содержит окисную пленку, в которой имеются атомы внешней среды (O_2, C, N_2). Окисная пленка должна быть хорошо сцеплена с металлом инструмента и обладать определенной твердостью.

Тепловой износ наблюдается при повышенных температурах и имеет место в тех случаях, когда скорости относительного скольжения и нагрузки достаточны для термического размягчения и даже плавления металла.

Абразивный износ характеризуется тем, что из-за наличия твердых абразивных частичек, которые появляются в процессе деформации, происходит смятие поверхности, срезание части металла с образованием стружки. Абразивными частицами могут быть окислы и продукты износа.

Усталостный износ возникает из-за усталости металла вследствие поверхностных нагрузок и температур. При этом появляются микротрещины, которые располагаются под небольшим углом к поверхности трения.

Один из видов износа в инструменте при эксплуатации обычно является преобладающим. В зависимости от времени он может быть сначала одного, затем другого вида.

В первом приближении объем стертого материала на единицу пути скольжения Z пропорционален суммарной нагрузке W и обратно пропорционален $\sigma_т$ более мягкого материала:

$$Z = \gamma(W / 3\sigma_T),$$

где γ – доля связей, обеспечивающих образование частицы.

В первом приближении зависимости стойкости инструмента от интенсивности износа можно придать линейный характер (рис. 16).

$C = \gamma(Z_{доп} / U)$, где $Z_{доп}$ – допустимое количество образования продуктов износа; U – интенсивность износа (определяется ме-

тодом радиоактивных изотопов). Чем продолжительнее контакт, тем больше интенсивность износа (см. рис. 16).

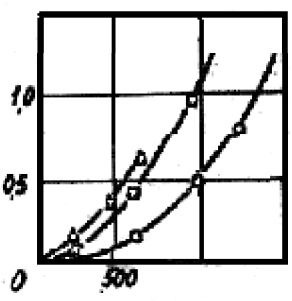


Рис 16. Зависимость износа рабочей поверхности матриц
от количества полученных поковок при различной длительности контакта

Если требуется оценить новый вариант, например режим упрочнения или условия эксплуатации, то

$$\frac{C'}{C''} = \frac{\gamma'}{\gamma''}\frac{U''}{U'}\frac{Z'_{доп}}{Z''_{доп}}.$$

3.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СМАЗКИ

Снизить износ инструмента позволяет применение технологических смазок, которые уменьшают трение скольжения, облегчают заполнение полости инструмента, создают разделительную прослойку, препятствующую местному охватыванию деформируемого металла с инструментом, сокращают потерю тепла заготовкой и снижают нагрев инструмента. Обычно смазки состоят из носителя (вода, минеральные масла, растительные и животные жиры и т. д.), активной составляющей (графит, соль, стекло, алюминиевая пудра, дисульфид молибдена и т. д.) и наполнителя (графит, тальк, мел, слюда, глина и т. д.).

Если смазка предназначена для инструмента, то ее капля должна приобретать форму IV (рис. 17) или II, что свидетельствует о том, что смазка не склонна к выдавливанию и переходу на деформируемый металл. Формы капли I и III в этом отношении не-

удовлетворительны. При нанесении смазки на заготовку капля должна приобретать форму I и II. Форма капли III свидетельствует о неограниченной способности к выдавливанию.

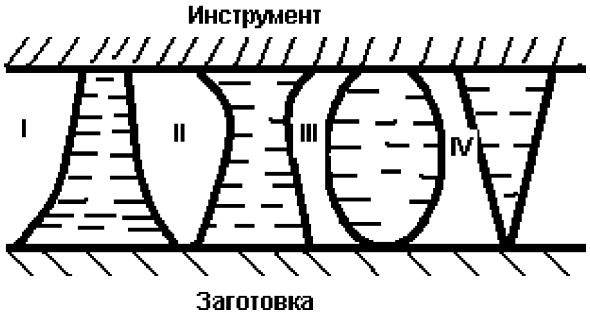


Рис. 17. Формы капель смазки, наносимой на инструмент или заготовку

При горячей штамповке наиболее распространенными являются водно-графитовые и графитомасляные смазки. Графит в виде суспензии находится в носителе – воде, масле или летучих растворителях. Иногда к графитомасляной смазке для увеличения ее эффективности добавляют активные составляющие (дисульфид молибдена, соль, смолу и т. д.), что придает ей стабильность и повышенный температурный предел работоспособности.

При температуре штампов ниже 400° С в качестве смазки успешно используют суспензию коллоидального дисульфида, молибдена в воде, масле. Вместо графита также используют суспензию талька и слюды в масле (индустриальном, цилиндровом). Для создания разделительной прослойки между инструментом и заготовкой, когда требуется защита от окисления и термическая изоляция, применяют свинцовые белила, порошок алюминия и стекла.

При холодной штамповке смазка должна быть поверхностно активной, чтобы противостоять выжиманию при больших контактных давлениях. Чем тоньше заготовка, тем более тонким должен быть слой смазки. При штамповке углеродистых и легированных сталей в качестве смазки используют фосфатные покрытия; для

нержавеющих сталей и никелевых сплавов – оксалатные покрытия; для титановых и циркониевых сплавов – фторидно-фосфатные покрытия. В совокупности с фосфатными, оксалатными и фторидно-фосфатными покрытиями часто используют мыло. Мыльные смазки используют и при выдавливании цветных металлов. При штамповке цветных металлов часто используют масла и жиры, такие, как ланолин и сульфидированный жир. В качестве активных присадок можно использовать синтетические моющие средства.

При волочении труб в качестве смазки применяют мазут, вапор, минеральные масла. Для улучшения смазочной способности минеральных масел к ним добавляют растительные и животные жиры, жирные кислоты, синтетические воски, смолы и другие присадки.

При прессовании применяют смазки на основе графита, вапора, дисульфида молибдена, свинцового сурика, серы, слюды, талька, солей стеариновой кислоты.

При прокатке основным типом смазок являются эмульсии (водномасляные смеси), являющиеся одновременно смазывающими и охлаждающими жидкостями.

Более подробное описание состава, применения и подачи технологических смазок дано в работах [38], [43].

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуются три основных этапа износа инструмента?
2. Основные виды износа.
3. Может ли быть один вид износа преобладающим в течение всего периода эксплуатации инструмента?
4. Что такое технологическая смазка?
5. Почему эффективность смазки определяется как ее активной компонентой, так и условиями удержания на поверхностях контакта?

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 3

3.1. В процессе вырубки происходит интенсивный износ вырубного штампа, что снижает качество изготавливаемых деталей, на которых образуется заусенец. Величина износа штампа определяется двумя факторами: а) углом $\alpha\,(x_1)$ установки пуансона относительно зеркала матрицы; б) эксцентриситетом $h(x_2)$ между пуансоном и матрицей. При проведении опытов по плану полного факторного эксперимента 2^2 (табл. 3.1) были приняты следующие интервалы варьирования факторов: x_i = 0°–0,5°; x_2 = 0–0,045 *мм*. Параметром оптимизации y служила стойкость штампа C (в тыс. ударов).

Построить математическую модель, описывающую влияние точности установки на стойкость инструмента вырубного штампа. Провести анализ модели.

Таблица 3.1. **Условия проведения опытов**

№ опыта	$x_1(\alpha)$	$x_2(h)$	y_1	y_2
1	0,0	0,0	38	37
2	0,5	0,0	17,4	16,2
3	0,0	0,045	23	25
4	0,5	0,045	6,6	7,2

3.2. При измерении твердости материала HRC наиболее изнашиваемого участка штампа для горячей штамповки при разной температуре t °C были получены следующие результаты: 400 °C – HRC = 52; 450 °C – HRC = 49; 500 °C – HRC = 43.

Найти температурную зависимость твердости материала штампа в виде $H - H_0 + at$.

3.3. Установите корреляционное уравнение, связывающее изменение радиуса R посередине бочки, обусловленное износом от

количества прокатанного металла K в *тыс. т*, если результаты наблюдений были следующими: $R = 200$ *мм* (при $K = 0$); $R = 199{,}5$ *мм* (при $K = 5$); $R = 199{,}1$ *мм* (при $K = 10$); $R = 198{,}3$ *мм* (при $K = 20$).

3.4. Дана корреляционная табл. 3.2 для величин C и S, где C – стойкость штампа, в тыс. поковок, S – усредненное значение износа на мостике облойной канавки, в *мм*.

Определить коэффициент корреляции и вид уравнения. Целые числа, приведенные в таблице, являются кратностями значений соответствующих случайных точек.

Таблица 3.2. **Корреляционная таблица *C* и *S***

Износ S, *мм*	Стойкость C, тыс. поковок		
	2	5	10
0,2	11	4	1
0,4	5	6	2
0,6	1	3	3

3.5. В процессе эксплуатации вырубного штампа были получены следующие значения высоты заусенца на вырубаемой детали в зависимости от числа отштампованных деталей: 1) 50 *мкм* (20 тыс. шт.); 2) 63 *мкм* (40 тыс. шт.); 3) 76 *мкм* (60 тыс. шт.); 4) 122 *мкм* (80 тыс. шт.); 5) 185 *мкм* (100 тыс. шт.).

Установить, когда целесообразно произвести переточку инструмента.

4. НЕОБРАТИМЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

4.1. ВИДЫ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Смятие или локальная пластическая деформация элементов поверхности деформирующего инструмента – наиболее распространенный вид необратимых деформаций при эксплуатации инструмента. При смятии происходит изменение формы и размеров наиболее нагруженных инструментов сверх допускаемых. Процесс смятия наиболее интенсивно развивается в местах совместного действия максимальных температур и давлений, затрагивая значительные объемы металла инструмента.

При смятии уменьшается высота выступающих элементов инструмента, увеличиваются размеры полости ручьев в плане, искажается их конфигурация; наблюдается также изгиб пуансонов, игл, оправок, деформация хвостовиков и блоков под рабочие вставки. Например, при штамповке осадкой наблюдается смятие стенок матрицы, знака, выталкивателя и выступов матрицы и пуансона. «Поднутрение» знака неизбежно приводит к застреванию поковок.

Деформирующий инструмент выходит из строя не только из-за смятия, но и из-за образования единичных трещин и последующего хрупкого разрушения в связи с динамическим и циклическим воздействием сил. На рабочих поверхностях инструмента сложной конфигурации с глубокими вырезами обычно обнаруживаются единичные мелкие и глубокие трещины в углах, на вертикальных стенках, в основании углублений. Если трещины неглубокие, то работоспособность инструмента будет определяться скоростью их распределения в длину и глубину. Образование глубоких трещин и разрушение характерны для хрупкого инструмента. Образование единичных трещин и хрупкое разрушение инструмента вызывается главным образом концентрацией напряжений в местах резких переходов, неблагоприятной схемой напряженного состояния, наличием в металле инструмента металлургических дефектов. Например, молотовые штампы часто выходят из строя в результате обра-

зования усталостных трещин и последующего разрушения в местах сопряжения хвостовика с заплечиками под действием ударно-циклических нагрузок.

Современная теория разрушения металлов рассматривает разрушение не как мгновенный акт, а как процесс развития трещины под действием напряжений. Причем хрупкое разрушение, вызываемое периодическими пластическими сдвигами, наступает тогда, когда исчерпан весь ресурс вязкости металла инструмента.

4.2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, ВЫХОДЯЩЕГО ИЗ СТРОЯ ПО НЕОБРАТИМЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ

В основе формулы, с помощью которой можно прогнозировать стойкость инструмента по необратимым деформациям [14], положена известная из практики эксплуатации инструмента зависимость стойкости от твердости материала (рис. 18). С увеличением твердости, стойкость сначала возрастает, достигает максимума, а затем падает (из-за развития разгарных трещин), поэтому будем рассматривать только область I и аппроксимируем ее следующим уравнением: $C = \alpha(\beta H_{ср})^n$, где α – функция, учитывающая конфигурацию инструмента и режим деформирования; $H_{ср}$ – средняя твердость инструмента при 20 °С, которая проявляется на участке наибольшего разупрочнения инструмента в рамках времени его эксплуатации; β – температурный коэффициент падения твердости, равный отношению твердости материала при максимальной температуре деформирования $H_{t\,max}$ к твердости при температуре 20 °С, n = 0,2. При сравнении двух видов инструмента, не

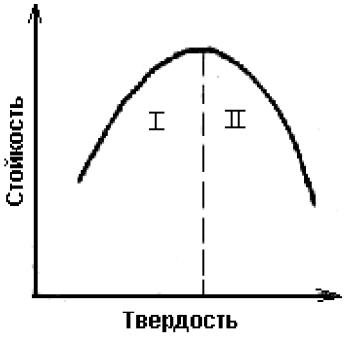


Рис. 18. График зависимости стойкости инструмента от твердости материала

отличающихся по конфигурации и режиму эксплуатации, расчетная формула принимает вид

$$C'/C'' = \left(\beta' H'_{ср} / \beta'' H''_{ср}\right)^5 \qquad (15)$$

Сущность расчета $H_{ср}$ для двух сопоставляемых материалов или режимов их упрочнения поясняет рис. 19.

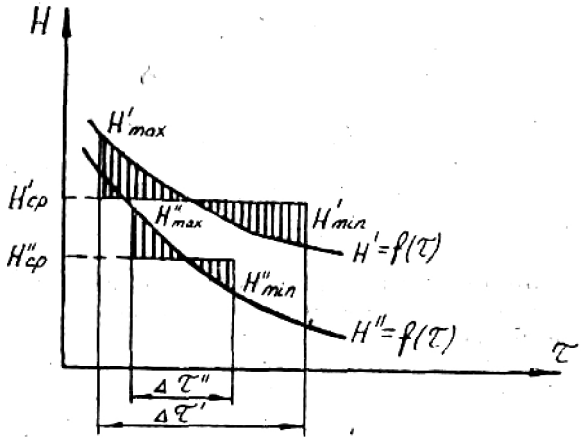


Рис. 19. Схема расчета H на основе кривых упрочнения

На кривой материала эталона-инструмента H'' отмечаем две характерные точки $H''_{\min}$, $H''_{\max}$, соответствующие начальной и конечной твердости участка инструмента, из-за деформации которого произошел выход эталона-инструмента из строя. По участку между этими точками определяем $H''_{ср}$. Далее определяем H'', для чего отмечаем точку $H'_{\max}$. В первом приближении придаем значение $H'_{\min}$, близкое $H''_{\max}$. Затем вычисляем $H_{ср}$ и по формуле (15) определяем отношение C'/C''. Если C'/C'' и $\Delta\tau'/\Delta\tau''$ численно совпадают, то расчет выполнен правильно. В противном случае способом повторного приближения выполняют повторный расчёт $H_{ср}$.

Число циклов, которое способен выдержать материал инструмента до образования трещины, $N_{\max} \approx A_{пр} / A_{ц}$, где $A_{пр}$ – предельная работа пластической деформации в очаге зарождения трещины

(как показывают эксперименты, $A_{пр} \approx A_{изл}$); $A_ц$ – работа пластической деформации за один цикл, $A_ц = \int \sigma d\varepsilon$. Физический смысл $A_ц$ основан на известном явлении механического гистерезиса, а численная величина предопределяется площадью, заключенной внутри петли гистерезиса.

При замене материала инструмента или способа упрочнения можно считать, что

$$N'_{max} / N''_{max} = A'_{изл} / A''_{изл}$$

где $A'_{изл}, A''_{изл}$ – работа излома сопоставляемых материалов, устанавливаемых испытанием по стандартной методике.

При отборочных испытаниях конструкций инструмента, материалов или способов упрочнения можно использовать, например, теорию наибольших нормальных напряжений, согласно которой $\sigma \le R_0$, – где R_0 – сопротивление отрыву; σ – напряжение растяжения в наиболее опасной точке. Экспериментально установлено, что $R_0 \sim \sqrt{AE}$, где A – работа пластической деформации; E – модуль упругости. Поэтому лучший из сопоставляемых двух вариантов инструмента по допускаемым напряжениям может быть выявлен из выражения

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma''_1} = \frac{\sqrt{A'E'}}{\sqrt{A''E''}}.$$

4.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА

В процессах формоизменения изделий деформирующий инструмент испытывает значительные силовые нагрузки, которые в большинстве случаев обуславливают необратимые деформации. Уровень силового воздействия на инструмент обычно характеризуется либо величиной давления на контактные поверхности, либо величинами нормальных и касательных напряжений.

Для приближенного определения напряженного состояния в местах наиболее вероятного зарождения и развития трещин, установления факторов, влияющих на стойкость инструментов, используют следующие экспериментальные методы: рентгеноструктурный – для определения остаточных напряжений первого рода в поверхностных слоях; поляризационно-оптический – для моделирования внутренних напряжений; метод фольговых датчиков – для определения нормальных напряжений на поверхностях взаимодействия деформируемого металла с инструментом.

Рентгеноструктурный метод определения остаточных напряжений первого рода основан на том, что действующие в поверхностном слое напряжения σ_1 и σ_2 меняют межплоскостные расстояния $\Delta d / d$ в направлении, перпендикулярном поверхности образца. В соответствии с законом Гука

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; Е – модуль упругости; значение $\frac{\Delta d}{d}$ находят по съемке напряженного и ненапряженного образцов.

Поляризационно-оптический метод для моделирования напряженного состояния элементов деформирующего инструмента основан на способности прозрачных изотропных материалов временно приобретать свойство двойного лучепреломления при наложении силового поля. Сущность этого явления заключается в разложении поляризованного луча на два луча, распространяющихся в оптически чувствительном материале в двух взаимноперпендикулярных плоскостях с различными скоростями. Поскольку скорости различные, то после прохождения лучей через нагруженную модель обнаруживается разность хода $R = cd(\sigma_1 - \sigma_2)$, где c – оптический коэффициент; d – толщина модели.

Располагая картинами изохром (геометрическое место точек постоянной разности хода лучей), а также граничными условиями

в напряжениях, можно определить компоненты напряжений σ_1 и σ_2 для каждой внутренней точки модели инструмента.

Метод фольговых датчиков для определения нормальных напряжений на контакте основан на измерении высоты отпечатков *h* на фольге из пластичного металла толщиной *S*, перекрывающей гнезда (калиброванные измерительные отверстия диаметром 1,0...2,0 *мм*) на поверхности инструмента (рис. 20). По высоте отпечатков судят о распределении нормальных напряжений по поверхности контакта.

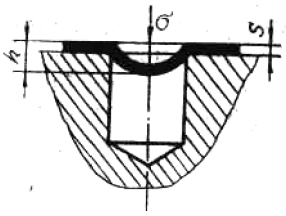


Рис 20. Схема фольгового датчика

Тарировка датчиков производится резиной в замкнутом объеме при различных значениях гидростатического давления σ. Получают график «глубины отпечатка h - σ (рис. 21).

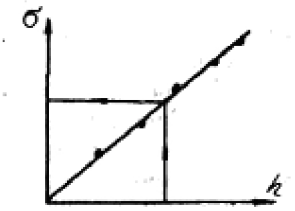


Рис. 21. Тарировочный график

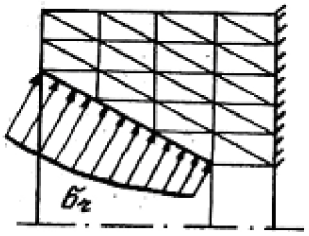


Рис. 22. Разбиение сечения волоки на треугольные элементы

Для моделирования напряженно-деформированного состояния инструмента используется также метод конечных элементов (МКЭ) [34]. В соответствии с МКЭ конструкция инструмента (рис. 22) аппроксимируется элементами конечных размеров, соединенных в узлах. При этом каждый элемент является частью заменяемой среды, т. е. сплошное тело условно делится на элементы конечных размеров, имеющих те же физические свойства, что и рассматри-

ваемая среда в месте расположения элемента. Напряжения, деформации и перемещения для каждого элемента находятся из условия равенства работы внешних сил на возможных перемещениях и работы внутренних сил.

Контрольные вопросы

1. Когда деформация инструмента является необратимой?
2. Какие изменения в структуре материала инструмента приводят к его разрушению?
3. Как влияет твердость материала инструмента на характер необратимых деформаций?
4. Какие методы определения напряженного состояния деформирующего инструмента вы знаете?
5. С какой целью проводят исследования напряженного состояния инструмента?
6. Из каких составных частей складываются действующие напряжения в инструменте?
7. Что называют температурным коэффициентом падения твердости?

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 4

4.1. С целью увеличения стойкости инструмента по необратимым деформациям была предложена новая конструкция штампа для изготовления круглых в плане поковок. Старый штамп в 10 испытаниях прослужил в среднем 4,4 месяца со среднеквадратичным отклонением 0,05 месяца. Предлагаемый новый штамп при 6 испытаниях требовал замены в среднем после 5,5 месяцев работы со среднеквадратичным отклонением 0,9 месяца. Действительно ли новая конструкция штампа лучше? (Используйте $\alpha = 0{,}05$.)

4.2. Построить корреляционное уравнение стойкости молотовых штампов C (тыс. шт.) по необратимым деформациям от отношения массы штампов $M_{ш}$ к массе поковок $M_{п}$ при данных табл. 4.1.

Таблица 4.1. **Значения стойкости штампов**

$\frac{M_{ш}}{M_{п}}$	20	25	28	28	35	39	42	45	60	70
C	1,8	1,0	3,0	2,4	2,4	3,6	1,5	1,8	2,4	3,8

4.3. Вероятность выхода штампа ВСМ из строя по необратимым деформациям в течение одной рабочей недели α (α – малое положительное число, второй степенью которого можно пренебречь). Какова вероятность того, что за 5 недель штамп не выходит из строя? Решить задачу при $\alpha = 0{,}01$.

5. ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

5.1. ПРОКАТНО-ПРЕССОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В о л о к и [6], [40]. В первом периоде на рабочей зоне в месте входа заготовки образуется кольцо (рис. 23). В месте начинающегося течения протягиваемого металла частицы поверхности канала выкрашиваются, поверхность становится неровной, что, в свою очередь, усиливает дальнейшее выкрашивание, так как давление концентрируется все больше на выступающих точках. Кольцо износа становится шире, глубже и более неровным.

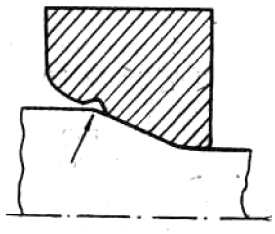


Рис. 23. Схема износа волоки

Края кольца с внутренней стороны несколько заостряются и начинают сдирать смазку и поверхностный слой протягиваемого металла, вызывая появление царапин и задиров. В то же время от заостренного края кольца отрываются отдельные частицы поверхности канала, вызывающие раздирание калибрующей зоны. Размеры изделия, выходящего из этой волоки, постепенно увеличиваются. Волока служит до тех пор, пока размеры изделия не станут выходить за пределы допустимых отклонений.

М а т р и ц ы [36]. Матрица является наиболее важным инструментом, в котором изменяется форма заготовки, поэтому она – наиболее изнашиваемая часть прессового инструмента. Основные причины разрушения матриц: потеря формы и размеров канала, хрупкое разрушение и разгарные трещины. Канал матрицы изнашивается неравномерно. Наиболее интенсивное изнашивание отмечается в местах перехода входной части матриц к калибрующему пояску, на выступах формующей части отверстия (рис. 24). Это связано с местным увеличением напряжений в деформируемом металле и повышенным местным разогревом металла инструмента. Износ рабочего (калибрующего) пояска выражается в развитии

процесса схватывания, пластической деформации очка, сопровождаемых отделением и уносом частичек металла и образованием рисок, задиров, наплывов.

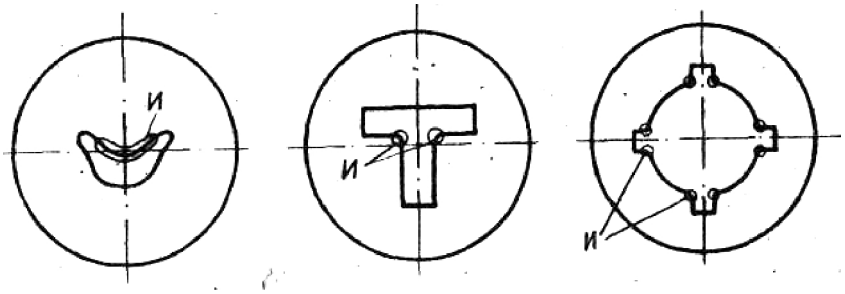


Рис. 24. Расположение участков интенсивного износа по контуру матрицы

Неправильная калибровка матриц приводит к затрудненному в отдельных местах течению металла и интенсивному износу. Динамическое нагружение матриц вызывает возникновение трещин в месте концентрации напряжений и температурных градиентов, а также последующие хрупкие разрушения. В результате действия температурных и структурных напряжений на рабочих поверхностях матриц появляются сетки разгарных трещин, которые постепенно расширяются и заполняются прессуемым металлом, что в дальнейшем приводит к разрушению матриц.

К о н т е й н е р ы [36]. Контейнер пресса служит для приема заготовки, нагретой до температуры прессования, и является высоконагруженным узлом. По габаритам контейнер – самая крупная деталь прессового инструмента. При деформации металла контейнер пресса испытывает высокие радиальные нагрузки, уровень которых может достигать 1000 *МПа* и выше. Для того чтобы противостоять таким нагрузкам, конструктивно контейнеры выполняют сборными, состоящими из двух, трех и более втулок или бандажированными намоткой высокопрочной проволокой или лентой. Втулки контейнера вставляют одна в другую с натягом, который достигается как горячей посадкой, так и применением конусности.

В наружной или промежуточной втулке располагают электронагревательные элементы для обеспечения предварительного подогрева контейнера.

Циклический нагрев и охлаждение рабочей втулки контейнера в совокупности с высокими нагрузками и термическими напряжениями обусловливают появление на рабочей поверхности сетки разгарных трещин 2–10 *мм*, рисок, борозд, налипов. Разгарные трещины быстро развиваются как в глубину, так и вдоль втулки.

В процессе эксплуатации происходит интенсивный износ втулок истиранием. Износу в значительной мере способствует то, что процесс прессования ведется без смазки поверхности контейнера.

Кроме того, активное воздействие на износ оказывает абразивное действие окалины и разупрочнение приконтактных слоев. Наиболее интенсивно процессы разупрочнения протекают в зоне пресс-остатка, где длительность контакта с прессуемым металлом максимальна. Наибольший износ наблюдается на длине распрессованного слитка. Это объясняется тем, что в начальный момент прессования возникают максимальные напряжения трения. С приближением к матрице износ втулки уменьшается и в зоне пресс-остатка имеет незначительную величину (рис. 25).

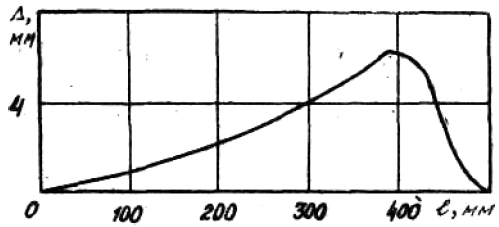


Рис. 25. Характер износа рабочей втулки контейнера

П р е с с - ш а й б ы [36]. Пресс-шайбы предохраняют пресс-штемпель от теплового воздействия со стороны деформируемого металла. В процессе эксплуатации пресс-шайбы подвергаются высоким напряжениям сжатия и интенсивному разогреву. При перемещении в контейнере в результате скольжения боковая поверхность

пресс-шайбы испытывает истирающий износ. Кроме того, износ пресс-шайбы связан с двусторонним нагревом рабочей кромки при прессовании. Металл, выдавливаемый в зазор между стенкой контейнера и боковой поверхностью пресс-шайбы, оказывает расклинивающее действие, деформируя кромку пресс-шайбы (рис. 26).

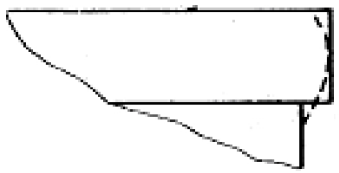


Рис. 26. Профиль пресс-шайбы:
—— до прессования,
------ после прессования

Происходит смятие и наплыв металла на лицевую поверхность пресс-шайбы. В конечной стадии выдавливания пресс-шайба толчком вступает в контакт с более прочным металлом из «мертвой» зоны. Это еще более интенсифицирует износ кромки. В результате деформации кромок и повышенного истирания боковой поверхности рабочий диаметр пресс-шайбы уменьшается, и она становится непригодной для дальнейшей эксплуатации. В конечной стадии в результате перемещения наружных слоев заготовки по пресс-шайбе от края к центру истирающему износу подвергается также и торцевая плоскость пресс-шайбы.

Пресс-шайбы также выходят из строя из-за радиальных и тангенциальных трещин, трещин на боковой поверхности. Радиальные трещины образуются в результате неравномерного нагрева. Пресс-шайба нагревается только со стороны одного из торцов, причем в радиальном направлении, т. е. от центра к периферии. Наружные зоны при этом нагреваются более сильно, чем зоны, примыкающие к центру пресс-шайбы. Это явление чаще всего наблюдается при прессовании с высокой температурой.

Выход пресс-шайб из строя из-за заплывания рабочей кромки чаще всего наблюдается тогда, когда увеличивается масса слитков и длительность цикла прессования.

И г л ы, п р е с с - ш т е м п е л и [36]. Иглы при прессовании труб и полых профилей испытывают растягивающие усилия трения

скольжения и интенсивное тепловое, силовое воздействие со стороны деформируемого металла. Трение скольжения, развиваемое в процессе перемещения слоев металла, вызывает разрушение поверхности иглы. Разрушение проявляется в постепенном, часто местном уменьшении диаметра, в образовании единичных продольных трещин, задиров, наплывов. Износ наиболее интенсивен около пресс-шайбы.

Основными причинами выхода пресс-штемпелей из строя являются смятие рабочего торца и изгиб из-за неудовлетворительной центровки.

В а л к и [8, 15, 17, 26, 31]. Валки холодной и горячей прокатки выходят из строя в результате износа и таких поверхностных дефектов, как порезы, вмятины, навар, трещины и отслоения. Складки и кусочки металла на поверхности листа, проходя через очаг деформации, продавливают поверхность валка, в результате чего возникают порезы и вмятины. При большом местном давлении и трении валки схватываются с металлом (образуется навар) и подвергаются сильному разогреву с последующим резким охлаждением. Это приводит к объемным и структурным изменениям: возникают напряжения предельной величины и в месте навара образуются трещины, выводящие валок из строя.

Навары, получаемые при оковывании валков прокатываемым металлом, вызывают последующее отслоение или выкрашивание поверхности бочки, приводящее к окончательному выходу валка из строя. Отслоению и выкрашиванию предшествует износ, упрочнение поверхностных слоев металла валка и образование зон усталостного разрушения. Оно зависит от числа циклов нагружения валков и величины внутренних, контактных и температурных напряжений, возникающих в процессе эксплуатации.

Износ поверхности бочки валка неравномерен. Участки поверхности рабочего валка, близкие к кромкам полосы, изнашиваются больше. У опорных валков максимальный износ – по центру бочки валка (рис. 27, *а*). Значительное влияние на износ оказывает

сетка разгарных трещин, образуемых на поверхности валка в результате циклических нагревов и охлаждений в процессе эксплуатации.

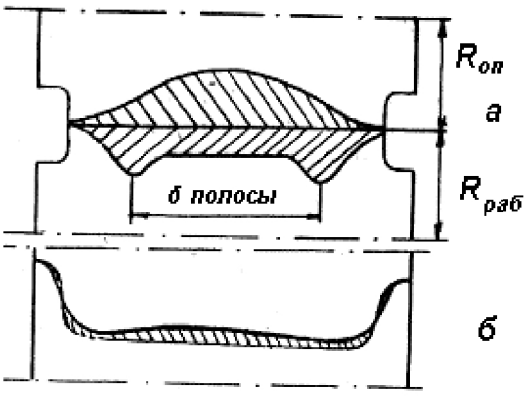


Рис. 27. Профиль и износ рабочих и опорных валков:
а – для листов; *б* – фасонных профилей

Основными разновидностями износа валков являются тепловой, окислительный и абразивный. *Тепловой износ,* обусловливающий сваривание трущихся поверхностей в микроскопически малых участках с последующим отрывом частичек поверхности валка и уносом их прокатываемым металлом, происходит в зоне контакта валка с прокатываемым металлом вследствие большого давления металла на валки и высокой температуры. Растрескивание поверхности ухудшает отвод тепла от точек контакта, что еще больше увеличивает тепловой износ.

Воздействие повышенных температур, воды и воздуха, а также пластическая деформация поверхностных слоев вызывают *окислительный износ* рабочей поверхности валка. Окислительный износ в валках развивается особенно интенсивно по причине пульсирующего контакта трущихся поверхностей.

При *абразивном износе* происходят процессы микропластического деформирования и срезания поверхностных слоев металла

твердыми абразивными частицами вследствие скольжения между прокатываемым металлом и валком.

При прокатке профилей в различных частях калибра может преобладать один из видов износа. В тех частях калибра, где отмечается большое скольжение, высокие удельные давления и на поверхности прокатываемого металла имеется слой окалины, в большей мере проявляется абразивный износ, а там, где металл имеет высокую температуру, больше проявляется тепловой износ.

Износ калибров валков неравномерен (рис. 27, *б*). Места максимального износа валков с вырезами находятся посередине ширины гребня и у открытого фланца. Большие давления металла на валки вызывают необратимые деформации (наплывы) кромок гребня валка с вырезом.

5.2. КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Штампы горячей штамповки [4, 25, 36, 41, 44]. В процессе горячей штамповки разрушение гравюры штампов протекает неравномерно и, кроме того, по различным механизмам (рис. 28). На участках *А* и *Б* – повреждения наибольшие. Разрушение поверхности протекает путем микрорезания и срыва «мостиков» сварки в условиях интенсивного развития разгарных трещин. На участке *В* скольжение металла отсутствует. Образовалась только сетка разгарных трещин. На участке *Г* имеют место борозды с плавными переходами из-за пластического оттеснения металла штампа.

Истирание инструмента происходит в местах, подверженных силам трения при перемещении деформируемого металла относительно рабочей поверхности инструмента. Места прилипания (застойные зоны на контактной поверхности) соответствуют зонам затрудненной деформации металла, где истирание инструмента либо отсутствует, либо незначительно.

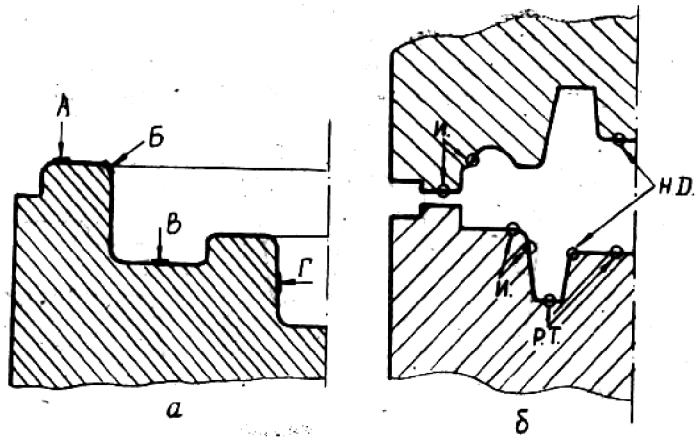


Рис. 28. Места локализации (*а*) и разновидности (*б*) разрушения штампов:
И – износ; Р.Т. – разгарные трещины; Н.Д. – необратимые деформации

Износ в большей степени зависит от геометрии гравюры штампов. Чем больше отношение выступа к его поперечному размеру, тем больше износ; напротив, для стенок полостей истирание тем больше, чем больше отношение ширины полости к ее высоте. Истиранию особенно подвержены стенки полостей, которые заполняются при выдавливании металла, все выступающие части ручьев и в первую очередь узкие части (например, ребра, бобышки, а также углы кромок). Истирание прогрессирует при появлении разгарных трещин. Чем меньше и глубже ячейки разгарной сетки, тем значительнее истирание штампов. Деформируемый металл под влиянием действующих внутренних сил затекает во все мелкие разгарные трещины, при перемещении по поверхности штампа еще больше увеличивая их. Износ поверхности, покрытой сеткой разгарных трещин, а также местное размытие и выкрашивание крутых и высоких составляющих рельефа шероховатой поверхности представляет собой эрозию штампа. Эрозия сопровождается увеличением объема полости штампа.

Под влиянием больших давлений, местного разогрева гравюра штампов в отдельных местах подвергается оплыванию, смятию и

другим необратимым деформациям, ведущим к искажению формы полости. Изменение гравюры штампов обычно происходит таким образом, что все размеры вертикальных стенок от действия боковых сил P увеличиваются в ширину, а все горизонтальные части под действием вертикальных сил Q подвергаются наклепу и растекаются в сторону в тех направлениях, где они встречают наименьшее сопротивление (рис. 29, *а*).

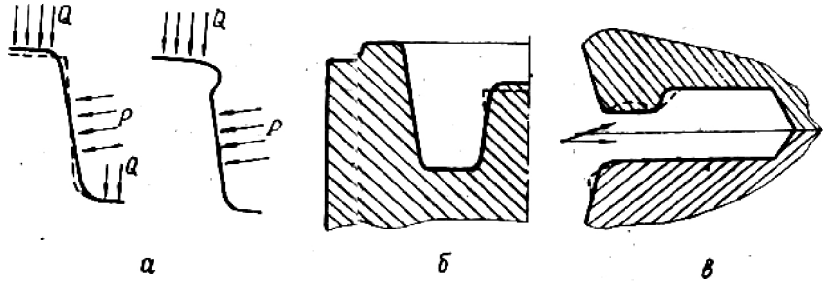


Рис. 29. Искажение формы отдельных элементов гравюры штампа до (–––––) и после (– – – –) штамповки: *а* – коническая полость; *б* – знак; *в* – облойная канавка

В процессе работы в месте перехода ручья в полость заусенечной канавки происходит уменьшение радиуса закругления. В конце концов образуется наплыв, или «грибок». Для его устранения желательно сделать большими уклон и радиус закругления.

Необратимая деформация кромок штампа зависит также от направления течений металла в полости (рис. 30).

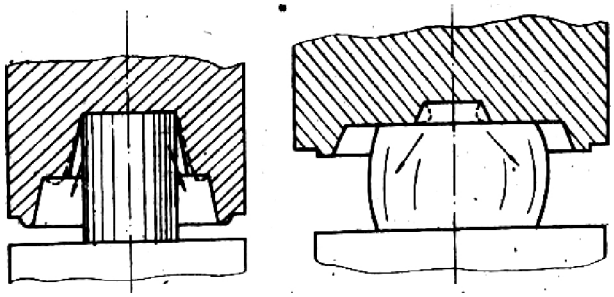


Рис. 30. Искажение конических углублений штампа от направления течения металла

При штамповке шестерни, когда металл течет для образования ступицы, возможно образование «поднутрения», что затрудняет извлечение поковки из ручья; когда металл течет для образования венца, возможно увеличение уклона штампа, что приведет к увеличению веса поковки. Наибольшим необратимым деформациям подвержены заусенечная канавка и знаки (см. рис. 29, *б*, *в*).

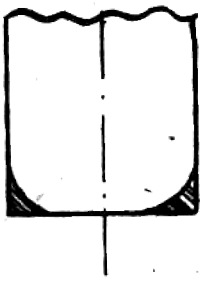


Рис. 31. Характер разрушения пуансонов штампов холодной штамповки

Штампы х о л о д н о й ш т а м п о в к и (13, 16, 21, 24]. В процессе эксплуатации штампов наиболее часто приходят в негодность основные его рабочие части – матрица и пуансон (рис. 31). Основные виды разрушения – это износ и смятие по контактным поверхностям. При износе происходит притупление режущих кромок, увеличение радиусов закруглений матриц и пуансонов. Износ прогрессирует при наличии интенсивного налипания (нароста).

Контрольные вопросы

1. Какой преобладающий вид износа имеет место?
2. Существует ли зависимость между геометрией рабочих поверхностей инструмента и характером его разрушения?
3. Чем характеризуется разрушение пресс-шайбы?
4. Какие виды износа и разрушения свойственны валкам прокатных станов?
5. Чем характеризуется различие износа рабочих и опорных валков при прокатке?
6. Как связаны разрушения и геометрия гравюры штампов при горячей штамповке?
7. Какие основные виды искажения формы гравюры штампов имеют место при горячей штамповке?

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 5

5.1. Установлено, что у прессовых игл диаметром 25,5 *мм*, изготовленных из стали марки 3×2В8Ф, твердость по Виккерсу на поверхности иглы изменяется в зависимости от числа прессовок следующим образом: HV = 500 (до прессования); HV = 440 (после 10 прессовок), HV = 370 (50 прессовок), HV = 320 (100 прессовок).

1) Указать причины понижения твердости, приводящие к отпуску металла.

2) Подобрать по способу наименьших квадратов для заданных значений N и HV многочлен 2-й степени $HV = a_0N_2+a_1N+a_2$.

3) Определить твердость поверхности иглы после 200 прессовок.

4) Найти максимальное количество прессовок, если допустимое падение твердости на поверхности иглы HV = 250.

5) Указать пути повышения стойкости прессовых игл.

5.2. Стойкость деформирующего инструмента зависит от множества факторов, в том числе и от его габаритных размеров. В частности, для прессовых матриц различной конфигурации были получены опытные данные, отраженные в табл. 5.1.

Таблица 5.1. **Влияние размеров очка матрицы на ее стойкость**

Диаметр очка матриц D, *мм*	20	60	100	140
Стойкость C, количество прессовок	210	400	560	820

Указать влияние габаритных размеров на стойкость инструмента и подобрать по способу наименьших квадратов линейную $C = a_0 + a_1D$.

6. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

6.1. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Механическая обработка деформирующего инструмента выполняется на сверлильных, токарных, фрезерных, строгальных, долбежных и шлифовальных станках. Из сверлильных применяют радиально- и вертикально-сверлильные станки. Они служат для сверления отверстий, например, для подъема и транспортировки штампов, запрессовки направляющих колонок, размещения нагревателей и т. д. Радиально- и вертикально-сверлильные станки применяют также и для обработки штампов и их деталей.

Из токарных применяют в большинстве случаев универсальные высокоточные токарно-револьверные и токарно-винторезные станки для изготовления инструмента преимущественно круглой формы: пуансоны, матрицы, штампы деталей к ним, пресс-шайбы, иглы и т. д. Для обработки крупных штампов преимущественно с ручьями, близкими по форме к телам вращения, используют токарно-карусельные станки.

К универсальным, применяемым для выполнения фрезерных работ, относят вертикально- и горизонтально-фрезерные станки. На этих станках фрезеруют заготовительные ручьи, облойные канавки, плоскости различных вставок, отдельные углубления и полости несложных ручьев. Обработку ручьев на вертикально-фрезерных станках производят по разметке и с применением шаблонов.

Первой операцией при обработке ручья штампа является черновое *фрезерование*. Эту операцию производят для удаления основной массы металла из полости ручья, при этом оставляют припуск от 1 до 5 *мм* на чистовое фрезерование. Чистовое фрезерование производят с высокой точностью пальчиковыми фрезами с профилем, позволяющим обеспечить требуемую конфигурацию ручья (уклоны и радиусы сопряжения стенок с дном).

Наиболее распространенным методом обработки плоскостей инструмента является *строгание* на универсальных поперечно-

строгальных, продольно-строгальных и фасонно-строгальных станках. Фасонно-строгальные станки все шире применяют для изготовления сложных наружных поверхностей обрезных пуансонов и сборных матриц. Инструмент со сложным профилем обрабатывают по разметке, нанесенной на его верхнем торце.

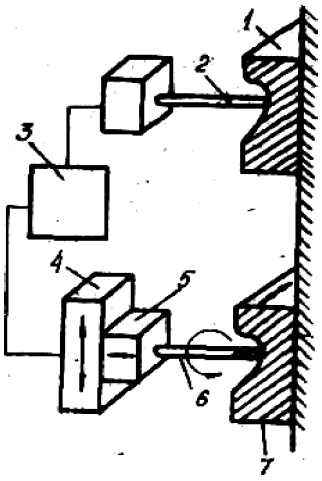


Рис. 32. Изготовление штампа на копировально-фрезерном станке: *1* – модель; *2* – палец копировального устройства; *3* – электронное устройство; *4* – поперечина; *5* – шпиндельная бабка; *6* – пальчиковая фреза; *7* – штамп

Такие виды инструмента, как пуансон ГКМ, обрезные матрицы, вальцовочные штампы обрабатывают на долбежных станках. Для обработки пространственно-сложных поверхностей инструмента применяют копировально-фрезерные станки с программным управлением, а также станки с фотоэлектромеханической системой управления, где в качестве задающего устройства используют чертеж. На рис. 32 показано изготовление штампа на копировально-фрезерном станке с помощью копира. Модель имеет полость, полностью соответствующую требуемой полости инструмента. По ее поверхности скользит палец копировального устройства и передает сигналы электронному устройству, обеспечивающие вертикальное перемещение поперечины, продольное – шпиндельной бабки и поперечное – стола с закрепленным на нем штампом. Фреза повторяет их относительно штампа и надрезает в нем такую же полость.

Шлифование – одна из важнейших операций механической обработки инструмента, обеспечивающая получение высокого класса шероховатости поверхности и точных размеров. При изготовлении инструмента широко применяют плоскошлифовальные и круглошлифовальные станки. При шлифовальных станках также

можно осуществить профильное шлифование с помощью специально профилированных кругов.

Окончательными операциями механической обработки инструмента являются *доводка* и *полирование*. Доводке подвергают главным образом закаленные инструменты. Сущность процесса доводки заключается в обработке поверхности инструмента твердыми и мягкими абразивными материалами. Полирование применяется для того, чтобы улучшить чистоту формообразующих поверхностей инструмента, устранить на них следы предыдущих операций обработки.

Очень часто доводку и полирование инструмента осуществляют на шлифовальных станках. Метод имеет следующие недостатки:

– при изготовлении инструмента происходит перерезание волокон, что влечет за собой повышение склонности инструмента к образованию трещин и износа;

– имеют место большие трудности в процессе изготовления инструмента из труднообрабатываемых металлов;

– после станочных операций требуется слесарная обработка, которая отличается низкой производительностью и вредными условиями труда.

6.2. МЕТОДЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Более эффективными, чем обработка резанием, являются методы пластического деформирования, используемые в основном для изготовления формообразующих полостей инструмента. Чаще всего инструмент изготавливают штамповкой или выдавливанием в горячем и холодном состоянии [42]. Горячая штамповка применяется для инструмента сложной формы с глубокими ручьями, холодная – для инструмента с неглубокими ручьями, без острых граней, тонких ребер, несимметричных углублений с большим уклоном. Холодное деформирование инструмента дает большую точность, обеспечивает лучшее качество поверхности, не требует нагрева штамповых блоков и упрощает процесс.

Изготовление инструмента методами пластического деформирования обеспечивает повышенный эксплуатационный ресурс, уменьшение расхода металла, снижение трудовых затрат, связанных с формообразованием сложной поверхности, а также пяти-, десятикратное повышение производительности труда рабочих-инструментальщиков.

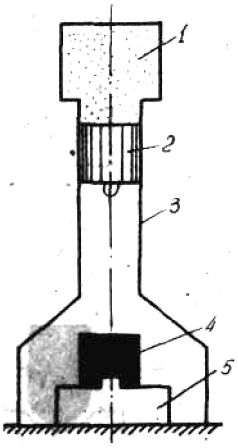


Рис. 33. Схема изготовления гравюры штампа на пороховой пушке: *1* – порох; *2* – мастер-пуансон; *3* – ствол; *4* – заготовка; *5* – основание

В последнее время все большее применение находит штамповка инструмента при больших скоростях деформирования 100–150 *м/с* на высокоскоростных молотах и пороховых пушках (рис. 33). Этот метод является практически единственным при изготовлении инструмента из высокопрочных штамповых сталей. Основной причиной, сдерживающей развитие данного метода, является то, что при сложной конфигурации рабочей полости возникают серьезные трудности, связанные с выбором числа переходов и конфигурации мастер-пуансонов.

6.3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электрофизические и электрохимические методы обработки используют для изготовления сложного рабочего контура прессовых матриц, матриц и пуансонов вырубных, пробивных и обрезных штампов, а также инструмента для горячей объемной штамповки. Они характеризуются рядом следующих особенностей: возможность обработки независимо от физико-механических свойств обрабатываемых материалов; небольшие механические усилия при осуществлении процесса обработки; отсутствие необходимости в более твердых инструментах, чем обрабатываемый материал; зна-

чительное уменьшение расхода обрабатываемого материала; высокая точность обработки; высокая производительность.

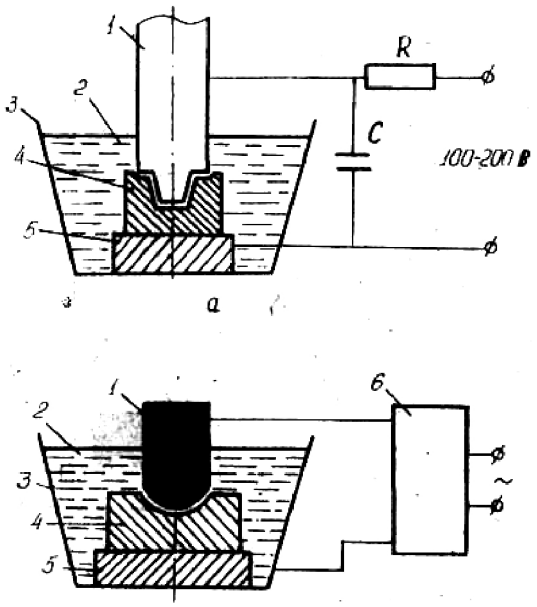


Рис. 34. Схема электроискрового (*а*) и электроимпульсного (*б*) методов изготовления инструмента: *1* – электрод-инструмент; *2* – диэлектрик жидкий; *3* – ванна; *4* – обрабатываемая деталь; *5* – столик; *6* – генератор импульсов

Для размерной обработки при изготовлении деформирующего инструмента широкое применение нашли электроискровая, электроимпульсная, электрохимическая и ультразвуковая обработка. Суть *электроискрового* метода состоит в следующем (рис. 34, *а*). Конденсатор *С* заряжается через сопротивление *R* от источника постоянного тока. По достижении на конденсаторе напряжения, равного напряжению пробоя, через зазор между электрод-инструментом и деталью происходит разряд. После этого конденсатор заряжается и процесс повторяется. В результате воздействия, электрического разряда происходит разрушение обрабатываемой детали. Электрический удар, обрушивающийся на электроды в виде эффекта торможения электронов на аноде и ионов на катоде,

создает на электродах кратковременно действующие источники тепла, распределенные в области ограниченных размеров. Нестационарный процесс распространения тепла от этих источников вызывает локальное плавление и частичное испарение металла поблизости от источника. Связи пораженных разрядом участков электродов с основной массой металла резко ослабляются, и под действием сил ударной волны расплавленный металл выбрасывается в межэлектродное пространство, где и застывает.

С целью увеличения интенсивности электрической эрозии между электродами помещается жидкий диэлектрик (обычно керосин или минеральное масло).

Длительность искрового электрического разряда составляет около тысячной доли секунды. Температура разряда – свыше 10000 °С. Съем металла 400–12000 *мм/мин*. Чистота поверхности – 5–7 класс частоты. Материалом для электрода-инструмента могут служить латунь, медь, графит или меднографитовая композиция.

Причины, сдерживающие развитие электроискрового метода, следующие:

– форма инструмента-электрода должна соответствовать форме наружного контура обрабатываемой детали или отверстия, а изготовление электрода сложной конфигурации трудоемко;

– электрод должен изготавливаться точнее обрабатываемой детали;

– одним электродом изготовить несколько деталей невозможно вследствие быстрого износа электрода.

Более производительной по сравнению с электроискровой является *электроимпульсная* обработка инструмента (рис. 34, *б*).

При этом резко уменьшается износ электрод-инструмента (примерно в триста раз). Полярность тока изменена на обратную (катодом является обрабатываемая деталь). Длительность импульса увеличивается до 500...10000 *мкс*. Температура разряда значительно снижается. Съем обрабатываемого металла происходит не в парообразном, а в основном в капельно-жидком состоянии.

Контуры отверстий в матрицах вырезают с помощью электрода в виде тончайшей медленно движущейся проволочки из латуни. Таким образом получают поверхность любого профиля с точностью 0,002 *мм* и обеспечивают шероховатость поверхности R_a = 1,6...0,8 *мкм* и точность размеров по 7–9 квалитету.

Схема вырезания показана на рис. 35. Заготовку закрепляют на столе станка, имеющем форму скобы. Заготовка должна иметь предварительно обработанное отверстие для пропускания через него электрода-проволоки. Электрод-проволока вводится в отверстие и во время работы станка сматывается с барабана на барабан, который вращается двигателем через редуктор. Скоба может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью суппортов, которые приводят в действие автоматические регуляторы подачи.

Автоматические регуляторы работают по программе и обеспечивают вырезание детали требуемого контура.

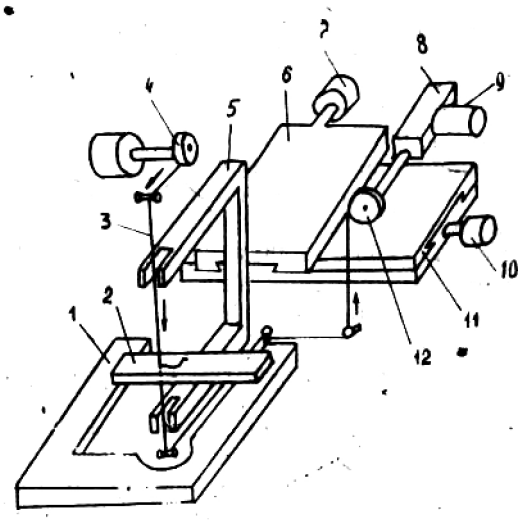


Рис. 35. Схема электроимпульсной обработки способом вырезания электродом-проволокой: *1* – стол; *2* – заготовка; *3* – электрод-проволока; *4*, *12* – барабаны; *5* – скоба; *6*, *11* – суппорты; *7*, *10* – автоматические регуляторы подачи; *8* – редуктор; *9* – электродвигатель

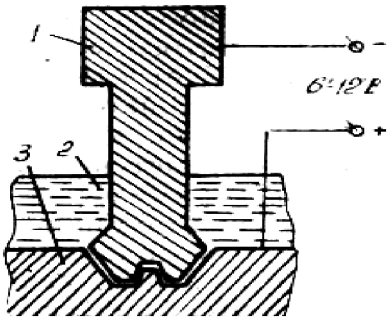


Рис. 36. Схема электрохимической обработки: *1* – инструмент-катод; *2* – электролит; *3* – штамп-анод

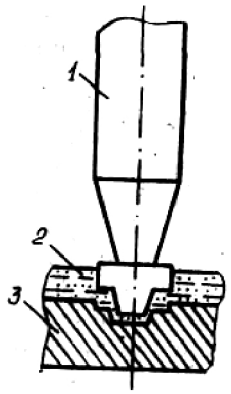


Рис. 37. Схема электрозвукового метода: *1* – мастер-инструмент; *2* – суспензия; *3* – штамп

Электрохимический метод основан на явлении анодного растворения, благодаря которому на изделии воспроизводится профиль катода инструмента в негативной форме (рис. 36). Специфической особенностью метода является высокая скорость движения электролита (преимущественно раствора NaCl) в зазоре между электродами, величина которого изменяется в пределах 0,1...0,5 *мм*. Движение электролита обеспечивает удаление продуктов анодного растворения, образующихся в большом количестве, и его охлаждение.

Электроды-инструменты изготавливают из меди, латуни или коррозионно-стойкой стали. Метод характеризуется высокой производительностью и нулевым износом электрода-инструмента, но требует применения источников тока большой силы. При его использовании возникают трудности по вымыванию осадков и образующихся газов. Отмечаются также затруднения управлением процесса при обработке сложнопрофилированных инструментов высокой точности.

Освоение электрохимической обработки профильного инструмента позволило в 15–18 раз сократить время их изготовления и уменьшить стоимость обработки.

При *ультразвуковом* методе изготовления электрические колебания высокой частоты 16...25 *кГц* передаются на торец мастер-инструмента (рис. 37). Одновременно в зону обработки под торец инструмента поступает суспензия зерен абразива в воде. Колеблющийся с ультразвуковой частотой мастер-инструмент ударяет по зернам абразива, последние выкалывают частицы металла штампа, осуществляя на нем копирование формы мастер-инструмента. В качестве абразива применяют карбид бора, карбид кремния или корунд. Этот метод используется для обработки хрупких материалов с точностью до 0,08 *мм* и чистотой поверхности R_a = 0,32 *мкм*.

6.4. МЕТОДЫ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

Стойкость инструмента, изготовленного методом точного литья, не уступает стойкости кованых штампов, а стоимость их изготовления в 4–7 раз меньше, чем при механической обработке. Применение данного способа снижает затраты на механическую обработку, упрощает технологию изготовления инструмента и сокращает производственный цикл. Кроме того, для производства инструмента в ряде случаев эффективны методы пластической обработки.

Теоретические предпосылки применения материала в литом состоянии для деформирующего инструмента основываются на особенностях литой структуры – ее каркасности, вследствие чего литому металлу присуще более высокое сопротивление пластической деформации при одновременно меньших значениях характеристик пластичности по сравнению с металлом того же химического состава, но подвергнутого обработке давлением. С повышением температуры разупрочнение литого металла протекает медленнее, чем деформируемого. Следует отметить также его более высокую износостойкость и разгаростойкость.

Способ получил распространение после того, как появился «Шоупроцесс», применение которого обеспечивает высокую точность отливок благодаря использованию керамических форм. Ке-

рамические формы состоят из керамической облицовки и наполнительной среды. Форму получают путем заливки модели жидкой смесью, состоящей из пылевидного кварца, кварцевого песка и гидролизованного этилсиликата. Керамический блок, затвердевший до требуемого состояния, поджигают для удаления летучих составляющих, а затем подвергают прокаливанию. После высокотемпературной (при 850...950 °С) прокалки в материале формы появляется много трещин. Они обеспечивают прохождение газов, но не могут быть заполнены металлом.

Кроме литья в керамические формы применяют литье в формы из термореактивных смесей, в металлический кокиль, облицованный керамической смесью, по выплавляемым моделям (обрезные штампы).

Почти вдвое больше деталей можно изготовить с помощью инструмента, полученного методом электрошлакового переплава (ЭШП). Установки для электрошлаковой переплавки позволяют производить переплавку старого изношенного инструмента и изготавливать из нее литой инструмент (матрицы, пресс-шайбы, штампы и т. д.). Подобную «реставрацию» можно производить пятикратно. В качестве электрода применяются, например, вышедшие из строя иглы. В плавильном пространстве расплавленный шлак и жидкий металл ванны являются источником тепла для дальнейшего ведения процесса расплава. Отливка инструмента производится в медный водоохлаждаемый кристаллизатор.

6.5. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Один и тот же процесс обработки металлов давлением может быть неоднозначен и реализован по своей экономической эффективности по различным вариантам деформирующего инструмента. Поэтому выбор оптимальной конструкции инструмента, способа изготовления и материала для инструмента необходимо обосновать путем вычислений, требующих построения математической моде-

ли. Для этого чаще всего используют линейное программирование как основной метод отыскания решения. В качестве критерия оценки оптимальности инструмента (целевой функции) принимают себестоимость изготовления полуфабрикатов, удельный расход инструмента или съем продукции с единицы инструмента. Целевую функцию записывают в виде

$$L = C_1X_1 + C_2X_2 + \ldots + C_nx_n.$$

На переменные $x_1, x_2, \ldots x_n$ накладывают систему ограничений

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1,$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2,$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n = b_m$$

и граничные условия $x_j \geq 0$, где $j = 1, 2, \ldots, n$; n – число переменных, m – число ограничений, a_{ij}, b_{ij} – заданные постоянные величины. Например, для процесса холодной листовой штамповки себестоимость изготовления детали (целевая функция) определяется выражением

$$L = (C_м + C_з + C_ш + C_о) \rightarrow \min,$$

где $C_м$, $C_з$, $C_ш$ и $C_о$ – удельные затраты на материал, заработную плату производственных рабочих, штамповый инструмент и оборудование.

Затраты на штамповый инструмент находят по формуле

$$C_ш = \sum \frac{nP_{шт}K_{шт}}{N}.$$

где n – количество штампов на операцию для выполнения готовой программы; $P_{шт}$ – стоимость штампа для каждой операции; $K_{шт}$ – коэффициент, учитывающий затраты на ремонт штампов; N – количество деталей, полученных до полного износа штампа.

Как видно из данного примера, себестоимость продукции в сильной степени зависит от затрат на изготовление и эксплуатацию технологического инструмента, поэтому с помощью технологической модели выбирают более оптимальный вариант исполнения

инструмента, обеспечивающий наименьшую себестоимость изготовления.

Задача. Инструментальный цех выпускает штампы двух видов $П_1$ и $П_2$. На эти изделия идут четыре вида материала S_1, S_2, S_3, S_4 (табл. 6.1). Сколько штампов $П_1$ и $П_2$ надо изготовить, чтобы при данных запасах материалов получить наибольшую выручку, если стоимость одного штампа $П_1$ – 70 руб., $П_2$ – 50 руб.?

Таблица 6.1. **Затраты материалов на штампы**

Материал	Запасы материала, шт.	Штампы	
		$П_1$	$П_2$
S_1	19	2	3
S_2	13	2	1
S_3	15	0	3
S_4	18	3	0

Решение. Предположим, что цех выпускает штампов $П_1$ – x_1, $П_2$ – x_2. Тогда целевая функция $L = C_1x_1 + C_2x_2 \to \max$, где C_i – стоимость штампов. На первый штамп $П_1$ расходуется материала $S_1 \to a_{11}x_1$, на второй $П_2$ – $a_{12}x_2$, на все штампы – $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \le b$, где b_1 – запасы материала S_1. Аналогичным путем находятся и другие ограничения. В конечном итоге получаем

$$\begin{aligned} 2x_1 + 3x_2 &\le 19, \\ 2x_1 + x_2 &\le 13, \\ 3x_2 &\le 15, \\ 3x_1 &\le 18. \end{aligned} \qquad (16)$$

Надо найти такие числа x_1 и x_2, удовлетворяющие неравенствам, при которых целевая функция имеет наибольшее возможное значение.

Задачу можно решить чисто геометрическим способом в координатах x_1, x_2. Каждая прямая неравенства делит плоскость на две

полуплоскости. По одну сторону от граничной прямой располагаются точки, удовлетворяющие неравенству, по другую – неудовлетворяющие. В совокупности на плоскости x_1Ox_2 граничные прямые образуют многоугольник – область изменения переменных (рис. 38). После вычисления целевой функции в каждой вершине многоугольника найдем, что наибольшую выручку цех получит при изготовлении штампов $П_1$ – 5 шт. и $П_2$ – 3 шт.

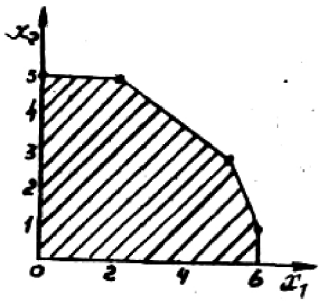


Рис. 38. Область решения системы неравенств (16)

При выборе способа изготовления деформирующего инструмента следует исходить из конкретных условий производства и характеристик инструмента. Ясно, что при изготовлении крупногабаритного инструмента преимущество надолго сохранится за обработкой на металлорежущих станках. В будущем, по-видимому, доминирующее положение в производстве деформирующего инструмента займут пластическое деформирование и точное литье. В настоящее время наиболее распространенным способом является обработка на металлорежущих и электроимпульсных станках.

Контрольные вопросы

1. Какие основные методы изготовления инструмента вы знаете?

2. Способы получения заготовок для деформирующего инструмента.

3. В каких случаях эффективны методы пластического деформирования при изготовлении рабочих поверхностей инструмента?

4. Чем характеризуются электрофизические и электрохимические методы обработки?

5. Чем характеризуется использование методов точного литья при изготовлении инструмента?

6. По каким критериям производится выбор оптимального варианта изготовления инструмента?

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 6

6.1. Шестнадцать матриц, изготовленных по старой технологии, проработали до разрушения в среднем 150 дней, среднеквадратичное отклонение составило 25 дней. Десять матриц, изготовленных по новой технологии, проработали до разрушения в среднем 120 дней, их среднеквадратичное отклонение равно 12 дням. Для $\alpha = 0{,}05$ установите, является ли новая технология с точки зрения стойкости лучше, чем старая?

6.2. Механический участок цеха по изготовлению деформирующего инструмента производит штампы холодной штамповки двух видов $Ш_1$ и $Ш_2$.

Какие штампы и в каком количестве следует изготовить в течение суток, чтобы цех получил наибольшую сумму прибыли от реализации готовой продукции, если станкозатраты на *i*-й штамп были следующими: для $Ш_1$ – 200 руб., для $Ш_2$ – 400 руб. Исходные данные см. в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Виды оборудования	Станкозатраты на один штамп, час		Суточный фонд, час
	$Ш_1$	$Ш_2$	
Токарные	2	4	24
Фрезерные	3	6	24
Сверлильные	0	3	24
Шлифовальные	2	2	24

7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

7.1. ПРОКАТНО-ПРЕССОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В прокатно-прессовом производстве используют следующие виды деформирующего инструмента: волоки, матрицы, контейнеры, иглы, пресс-шайбы, пресс-штемпели, валки и калибры.

Волоки. Основные этапы технологии производства стальных волок для волочения труб и прутков [6] следующие:

– разрезка исходных поковок на заготовки, равные по высоте;

– изготовление волок заданной формы «механической обработкой на металлорежущих станках;

– нагрев и закаливание волок струей воды, поступающей в рабочий канал волоки;

– шлифовка и полировка рабочего канала волоки.

Рабочий профиль волок для волочения фасонных профилей изготавливают тремя способами: механической обработкой, пластическим деформированием и электроэрозионным методом. Контроль формы волочильного канала заключается в заполнении его какой-либо твердеющей массой (парафин, воск) и последующем извлечении полученного слепка из канала для его замера.

Матрицы. Заготовки для матриц получают в виде проката или поковок. Этапы изготовления следующие:

– обработка габаритов матриц на универсальных токарных, фрезерных, сверлильных и шлифовальных станках;

– изготовление очка матрицы электроэрозионным и электроимпульсным методами; обработкой на специальных металлорежущих станках, в том числе станках с ЧПУ, слесарной обработкой, точным литьем, пластическим деформированием;

– термическая обработка с использованием метода ступенчатого нагрева до температуры закалки, главным образом в соляных ваннах. Охлаждение матриц также проводится ступенчато: сначала в соляных ваннах, а затем на открытом воздухе. Далее матрицы подвергаются шлифованию.

После изготовления матрицу подвергают корректировке (доводке). Если при опытном прессовании через изготовленную матрицу имело место отклонение угла полки профиля, то в зависимости от того, в какую сторону требуется отогнуть полку профиля, на рабочем пояске выполняют уклоны. На одном из рабочих поясков, формирующих данную полку, выполняют уклон на его входной части, а на другом – на выходной (рис. 39).

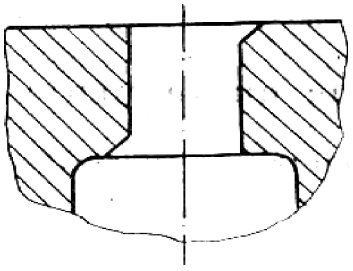


Рис. 39. Схема доводки калибрующего участка матрицы

Если имеет место изгиб или скручивание профиля из-за большой разницы скоростей истечения отдельных элементов, то для его устранения необходимо выровнять скорости истечения, например, за счет карманов или изменения длин тормозных поясков.

Контейнеры. Иглы. Пресс-штемпели. Пресс-шайбы. Эти инструменты в основном являются телами вращения и изготавливаются на токарных станках. Далее они подвергаются термообработке и шлифованию. При изготовлении контейнеров наибольшие трудности возникают в процессе получения отверстий для нагревательных элементов, так как при сверлении глубоких отверстий в высоколегированной стали часто происходит увод от начального положения. Сверление отверстий производят на специальных станках с магнитным отводом стружки.

При термообработке игл и пресс-штемпелей необходимо строго выдерживать вертикальность их подвески в печах при нагреве, а также при опускании в охлаждающую жидкость.

Валки. Особенности технологического процесса изготовления валков рассмотрим на примере рабочих валков для холодной прокатки. Этапы технологии следующие:

- выплавка стали заданной марки в электропечах (это существенно повышает чистоту и однородность металла);

- разливка в восьмигранные изложницы под вакуумом;
- ковка заготовок для устранения дендритной структуры;
- отжиг для повышения однородности структуры;
- обдирка, сверловка осевого канала;
- улучшение (закалка в масле и высокий отпуск) с целью растворения карбидной сетки, измельчения карбидов и образования структуры зернистого перлита или сорбита;
- механическая обработка под закалку;
- закалка объемная или поверхностная;
- первый отпуск для стабилизации структурных составляющих, снижения остаточных напряжений;
- окончательная механическая обработка (шлифовка);
- второй отпуск (старение);
- окончательная шлифовка;
- контроль дефектов на магнитном и ультразвуковом дефектоскопах.

Технологический процесс изготовления валков приводит к появлению остаточных напряжений, которые оказывают существенное влияние на их стойкость.

7.2. КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО [12, 23, 27, 28]

В кузнечно-штамповочном производстве используют следующие виды основного деформирующего инструмента: молотовые штампы, штампы для кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП), штампы для горизонтально-ковочных машин (ГКМ), обрезные штампы и штампы для холодной штамповки.

Молотовые штампы

Заготовки для штампов поступают на заводы-потребители в форме кубов и удлиненных прямоугольных параллелепипедов, называемых «кубиками». Для того чтобы из «кубика» изготовить

штамп, «кубик» должен быть подвергнут многократной обработке на различных универсальных и специальных» станках.

Построение операций механической обработки «кубиков» зависит от величины твердости и размеров. Штампы с высотой «кубика» до 300 *мм* проходят полный цикл механической обработки, закаливаются и отпускаются до твердости НВ 387-444, затем подвергаются слесарной обработке и полированию. Штампы с высотой «кубика» свыше 300 *мм* и до 400 *мм* проходят предварительную механическую обработку, закаливаются и отпускаются до твердости НВ 363-415, затем окончательно обрабатываются. Штампы с высотой «кубика» свыше 400 *мм* вначале закаливают и отпускают до твердости НВ 302-301, затем они полностью проходят полный цикл механической обработки и слесарной доработки.

Типовая последовательность обработки «кубиков» включает следующие операции: сверление подъемных отверстий на радиально-сверлильном или расточном станке; строгание граней «кубика», контрольных углов, хвостовика в виде «ласточкина хвоста» на продольно-строгальных, поперечно-строгальных стенках или фрезерование на вертикально-фрезерных станках торцевыми фрезами. После этого шлифуется плоскость разъема и проводится разметка ручьев и шпоночного паза.

Разметка – одна из наиболее ответственных операций при изготовлении штампа. Перед разметкой лицевую часть штампа покрывают раствором медного купороса, чтобы выделялись риски разметки. Контрольные стороны штампа являются двумя координатными осями, от которых начинается разметка.

Для обработки круглых ручьев, замков используют токарно-карусельные станки. Фигурные ручьи, выемки под клещевину, облойные канавки обрабатывают фрезерованием на вертикально-фрезерных станках. Взамен фрезерования часто используют электрофизические и электрохимические методы обработки ручьев (особенно при наличии у ручьев сложной полости). Молотовые

штампы также успешно изготавливают с применением электрошлакового переплава и точного литья.

Контроль качества изготовления гравюры штампа проводят по свинцовой или селитровой отливке. С этой целью обе половины штампа устанавливают вертикально и стягивают; затем в литниковую канавку заливают расплавленный свинец (баббит, сплав Вуда). По полученной отливке проверяют размеры, смешение половин штампа. После этого проводят доводочные работы: слесарная обработка ручьев в участках, недоступных для обработки на станках (с помощью пневматической шлифовальной турбинки); шлифование.

Для объемной штамповки на молотах применяют в основном цельные штампы. Их габаритные размеры колеблются в широких пределах. Так, штамп молота с массой падающих частей 0,63 *т* имеет размеры 180 (высота)×380 (длина)×380 (ширина) *мм* и массу 65 *кг*, а штамп молота с массой падающих частей 50 *т* – размеры 600×4500×1360 *мм* и массу 27 *т*. Габаритные размеры и масса штамповых кубиков, в зависимости от типа и массы падающих частей молотов, приведены в табл. 7.1.

При необходимости высоту штампового кубика для фрикционных молотов можно увеличить в 1,5–2 раза, для паровоздушных – в 1,2–1,5 раза, для бесшаботных – в 1,1–1,25 раза. Однако при этом следует соответственно уменьшить другие размеры кубика, с тем чтобы сохранить его максимально допустимую массу. В соответствии с ГОСТ 7831-71 масса заготовок для штампов не должна превышать 16485 *кг*; заготовки большей массы изготавливают по специальному заказу.

Выбор размеров и массы молотовых штампов и штамповых кубиков производят в соответствии с размерами поковки; при этом учитывают необходимость обеспечить достаточную прочность штампа, а также возможность одновременного изготовления двух и более поковок. Высота штампа определяется глубиной штамповочных ручьев, а длина и ширина – размерами поковки в плане; при этом учитывают размеры облойной канавки и стремятся

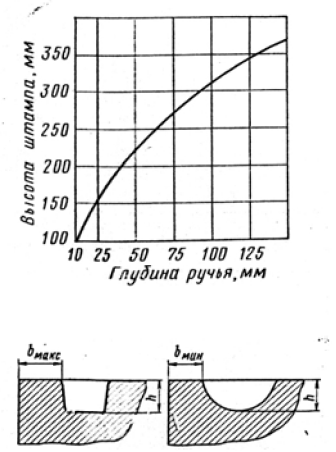


Рис. 40. Влияние конфигурации полости и глубины ручья на толщину стенки штампа

обеспечить необходимую толщину стенки штампа (рис. 40). В том случае, если на гравюре штампа расположено несколько ручьев, толщина разделяющей их стенки должна составлять 0,6 *b*, но не менее 10–11 *мм*. Масса верхнего штампа не должна превышать 30% от массы падающих частей молота (баба – шток – поршень); практически у паровоздушных молотов она составляет около 10%, а у фрикционных – около 25%.

Для удовлетворительного формообразования поковки при штамповке на молотах необходимо полное смыкание верхнего и нижнего штампов. Действующие при этом динамические нагрузки могут вызвать смятие зеркала штампа (свободной от ручьев и замков площади поверхности разъема). Поэтому необходимо проводить соответствующие расчеты на прочность. Рекомендуемые размеры зеркала штампов составляют: для молотов с массой падающих частей до 4 *т* – не менее 300 $см^2$ на 1 *т* массы падающих частей, для молотов с массой падающих частей более 4 *т* – не менее 250 $см^2$ на 1 *т* массы падающих частей.

Размеры бабы и штамподержателя, к которым крепят хвостовики штампов, определяют в соответствии с ГОСТ 7024-75; зазор между штампом и направляющей молота допускают не менее 10–20 *мм*.

Работоспособность молотовых штампов зависит прежде всего от конструктивных особенностей чистовых формообразующих ручьев; их износ является ведущим при определении стойкости

штампов. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделяется рассмотрению конструкции чистовых формообразующих ручьев.

Таблица 7.1. **Габаритные размеры и масса штамповых кубиков**

Тип молота	Масса падающих частей, *т*	Масса штампуемых поковок, *кг*	Габаритные размеры штампового кубика, *мм*				Масса штампового кубика, *кг*	
			высота	ширина	длина	минимальная высота без хвостовика	минимальная	максимальная
			максимальные					
Фрикционный	0,5	До 1	180	360	450	90	65	230
	0,75	1–1,5	180	400	500	110	75	280
	1,0	1,5–2,5	180	450	560	110	100	355
	1,5	2,5–5	220	600	670	130	150	695
Паровоздушный	0,63	До 1	180	380	380	90	65	205
	1,0	1-2,5	180	450	450	110	75	285
	2,0	2,5-7	220	560	670	130	200	650
	3,15	7-17	320	670	800	170	300	1260
	5,0	20-40	320	800	950	200	500	1910
	10,0	70-100	380	1000	1180	230	1000	3520
	16,0	180-300	500	1120	1500	250	1600	6595
	25,0	Более 300	500	1250	1800	300	2500	8830
Бесшаботный	5,0	20-40	300	710	1320	180	500	2205
	10,0	70-100	360	900	2000	230	1000	5085
	22,5	300 и более	500	1180	2800	290	2500	12700
	50,0	300 и более	600	1360	4500	320	5000	26800

Конфигурацию ручья рассчитывают по чертежу горячей поковки; при этом выбирают необходимые припуски и допуски, штамповочные уклоны, радиусы сопряжений, закруглений и переходов. Соответствующие рекомендации приведены в учебниках и справочниках по технологии горячей штамповки. В качестве примера укажем лишь, что наружные штамповочные уклоны составляют 3–7°, внутренние – 5–12°; радиусы сопряжений, закруглений и переходов достигают 1,5–5 *мм* (при высоте ребра до 5 *мм*) и 6–25 *мм* (при высоте ребра до 100 *мм*).

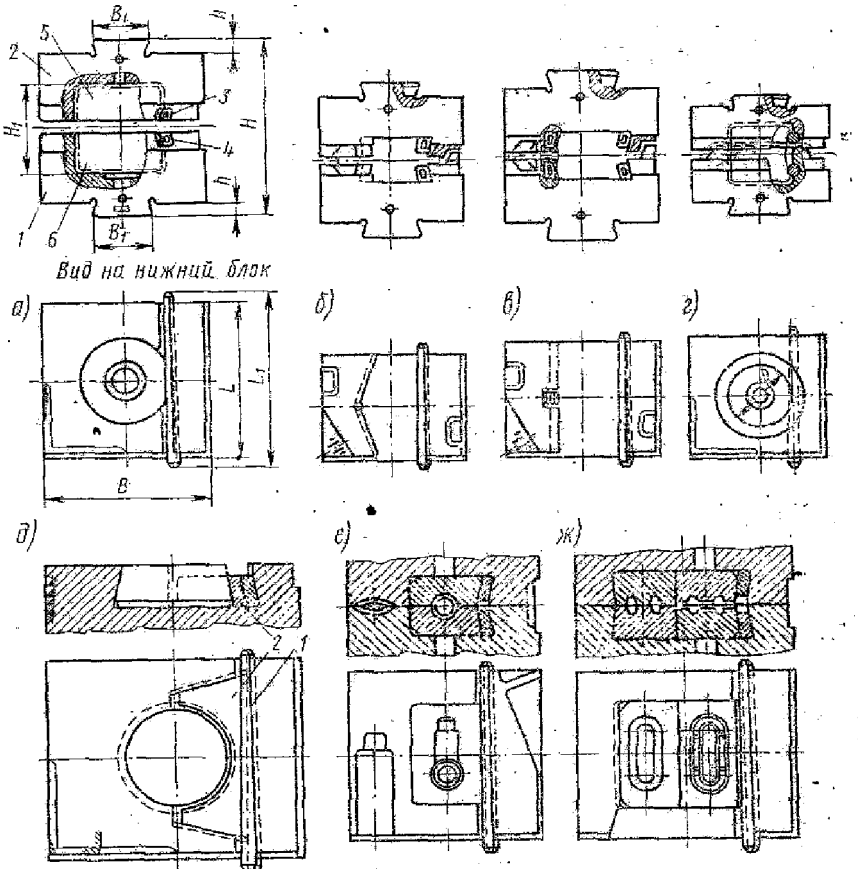


Рис. 41. Конструктивное исполнение молотовых блок-штампов с клиновым креплением вставок: *а* – обычный блок, крепление цилиндрических вставок призматическим клином; *б* – блок с замком и угловыми призматическими вставками; *в* – блок с замком и прямоугольными призматическими вставками; *г* – блок с замком, крепление цилиндрических вставок круглым клином; *д* – обычный блок, крепление цилиндрических вставок обоймой и клином; *е* – блок с закрытым (глухим) гнездом и прямоугольными призматическими вставками; *ж* – блок с полузакрытым гнездом и прямоугольными и призматическими вставками: *1*, *2* – соответственно нижний и верхний блоки; *3*, *4* – соответственно верхний и нижний клинья; *5*, *6* – соответственно верхняя и нижняя вставки

Горячую посадку цилиндрических вставок долгие годы считали единственно надежным способом крепления. В настоящее время ее применяют относительно редко. Это связано с отсутствием

взаимозаменяемости вставок и блок-штампов, необходимостью снимать штамп с молота для замены вставки, значительной трудоемкостью запрессовки и распрессовки вставки.

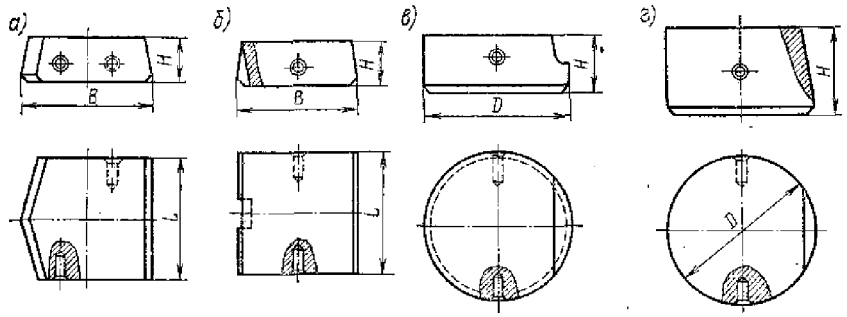


Рис. 42. Молотовые вставки с клиновым креплением: *а* – угловая призматическая; *б* – прямоугольная призматическая; *в* – цилиндрическая для крепления призматическим клином; *г* – цилиндрическая для крепления цилиндрическим клином

Для замены изношенной вставки весь штамп нагревают до температуры 200–300° С. Затем вставку охлаждают водяным душем (рис. 42). За счет интенсивного охлаждения размеры вставки уменьшаются; это позволяет легко удалить ее из гнезда. Вставку для замены подбирают в соответствии с фактическими размерами блок-штампа; этим обеспечивают рекомендуемый натяг (0,1–0,2% от диаметра). Затем блок-штамп нагревают, закладывают вставку и производят охлаждение до комнатной температуры; после охлаждения штамп снова готов к эксплуатации.

Горячую правку в правочных штампах на молотах и прессах с использованием нагрева под штамповку производят в том случае, если мощность соответствующего кузнечно-прессового борудования недостаточна для холодной правки. Ручей правочного штампа изготавливают по номинальным размерам поковки, размеры корректируют на величину усадки при частичном охлаждении поковки. Конструкцию правочного штампа следует по возможности упростить: спрямить сложный контур, не обжимать небольшие выступы, открыть ручей для улучшения доступа к поковке.

Штампы КГШП

Изготовление блоков штампов для КГШП сходно с изготовлением блоков штампов для листовой штамповки. В качестве заготовок плит блоков используют стальные отливки: их обрабатывают по плоскости и в сборе растачивают отверстия под колонки и втулки. После обработки гнезд размечают вставки, обрабатывают все остальные гнезда, пазы, окна, выполняют сборку механизмов выталкивания, зажимов и других деталей.

Цилиндрические вставки штампов КГШП обрабатывают на токарных станках, протачивают посадочную часть и растачивают концентрично расположенные полости-ручья. После токарной обработки следует закалка, шлифование посадочной части, шлифование и доводка рабочей полости вставки.

Призматические вставки обрабатывают в той же последовательности, что и молотовые штампы. Ручьи обрабатывают на копировально-фрезерных станках. Применяют также холодное выдавливание рабочих полостей вставок; кроме того, целесообразно применять различные электрофизические и электрохимические методы обработки.

Штампы кривошипных горячештамповочных прессов по назначению можно разделить на универсальные и специальные. Наиболее часто применяют универсальные штампы; они позволяют путем замены формообразующих элементов (ручьевых вставок, пуансонов и матриц) осуществлять штамповку поковок близкой конфигурации и размеров в одном пакете или блок-штампе. Специальные штампы применяют при массовом производстве для штамповки одной поковки сложной конфигурации в тех случаях, когда использование универсального штампа затруднено.

На рис. 43 приведена конструктивная схема универсального штампа для кривошипного горячештамповочного пресса усилием 20000 *кН* (2000 *тс*). Штамп предназначен для штамповки круглых в плане и имеющих удлиненную форму поковок. Соответственно этому применяют пакеты из трех цилиндрических или трех приз-

матических вставок. Штамп состоит из верхнего *1* и нижнего *2* блок-штампов. В нижнем запрессовывают направляющие колонки *3*, а в верхнем – втулки *4*.

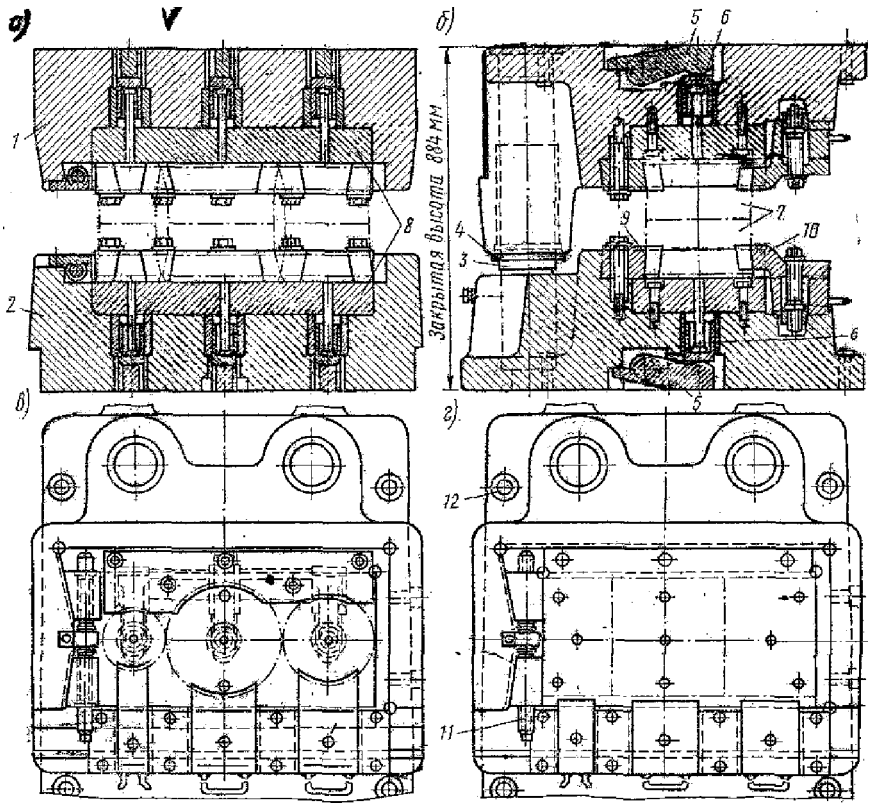


Рис. 43. Универсальный штамп для горячей штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе усилием 20000 *кН* (2000 *тс*): *а* – разрез параллельно фронту пресса; *б* – разрез перпендикулярно фронту пресса; *в*, *г* – вид сверху на нижний блок-штамп соответственно с цилиндрическими и призматическими вставками

С помощью специального рычажно-кулачкового механизма *5* приводятся в движение выталкиватели *6*, расположенные в верхнем и нижнем блок-штампах. Вставки *7* расположены на подштамповых плитах *8*; их крепят к блоку с помощью клиновых накладок *9* и скоб *10*. Для фиксирования вставок в направлении, параллельном

фронту пресса, служит винтовой зажим *11*. Блок-штампы крепят к ползуну и столу пресса болтами, проходящими через отверстия *12*.

Обычно в универсальных штампах применяют три пары вставок. При двухпереходной штамповке одна пара вставок нерабочая. В отдельных случаях применяют и четвертую осадочную пару вставок; ее обычно располагают отдельно от других вставок в передней части штампа. Как правило, вставку окончательного ручья размещают в центре пакета; место расположения других вставок зависит от того, с какой стороны подают заготовку и где расположен обрезной пресс.

Конструктивные схемы универсальных штампов кривошипных горячештамповочных прессов отличаются друг от друга исполнением системы выталкивания (центральная или рычажно-кулачковая), расположением накладок (правостороннее или левостороннее) и системой крепления нижних вставок (облегченное или усиленное крепление скобами или накладками). Схемы крепления вставок в пакетах представлены на рис. 44.

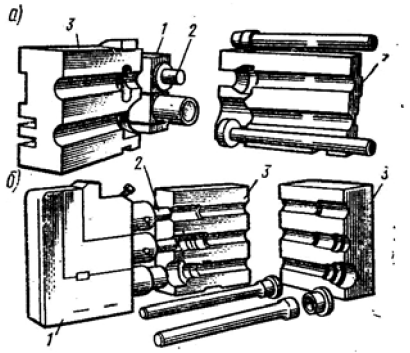


Рис. 44. Штампы горизонтально-ковочных машин: *а* – двухручьевой, *б* –трехручьевой; *1* – блок пуансонов, *2* – пуансон, *3* – полуматрицы

Штампы ГКМ

Штампы ГКМ обычно состоят из пуансонов и блока матриц из двух половинок, которые смыкаются перед тем, как производится высадка поковки, и размыкаются для удаления готовой поковки.

Блок матриц содержит несколько ручьевых вставок: заготовительные, пережимные прошивные, обрезные и т.д.

Пуансоны штампов обычно имеют цилиндрическую форму, поэтому их обрабатывают на токарных станках. В заготовках блока матриц вначале сверлят подъемные отверстия, затем заготовки строгают. После этого на плоскостях разъема обеих матриц размечают все ручьи, которые обрабатывают на горизонтально-расточных или вертикально-фрезерных станках.

Вставки матриц изготавливают из кованых заготовок. Если вставки должны образовать ручей цилиндрической формы, то их изготавливают ковкой в виде кольца и разрезают в виде двух полуколец. Далее обрабатывают плоскость разъема вставок. Рабочую полость вставок обтачивают или фрезеруют в зависимости от ее формы. Во вставках сверлят отверстия для крепления; после термообработки вставки пригоняют по гнездам блоков и их рабочую полость доводят окончательно.

Инструмент, предназначенный для горячей высадки поковок на горизонтально-ковочных машинах, состоит из блока пуансонов и блока матриц (рис. 44).

Особенности штампового инструмента горизонтально-ковочных машин следующие: ось деформирования горизонтальна, матрицы имеют разъем параллельно оси деформирования, число ручьев в матрицах обычно не менее двух (чаще всего 3–5).

На рис. 45 и 46 приведены конструкции штампов для высадки поковок на горизонтально-ковочных машинах. При высадке торсионного стабилизатора сначала производят набор металла на торце заготовки, а затем его формовку (рис. 45). При высадке муфты в первом ручье производят набор металла и предварительную прошивку отверстия, во втором оформляют наружные размеры поковки и углубляют отверстие, а в третьем калибруют отверстие и отрезают поковку от прутка (рис. 46).

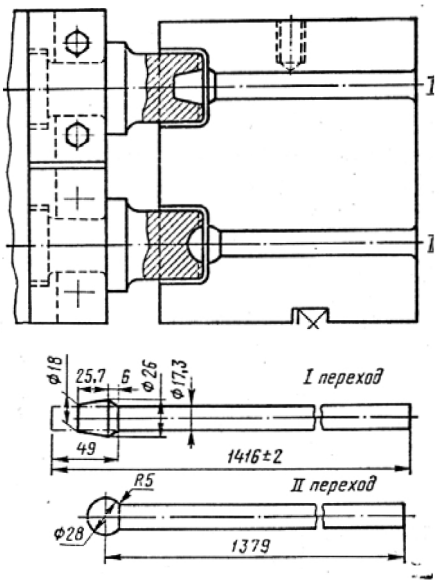


Рис. 45. Схема штампа для высадки головки торсионного стабилизатора

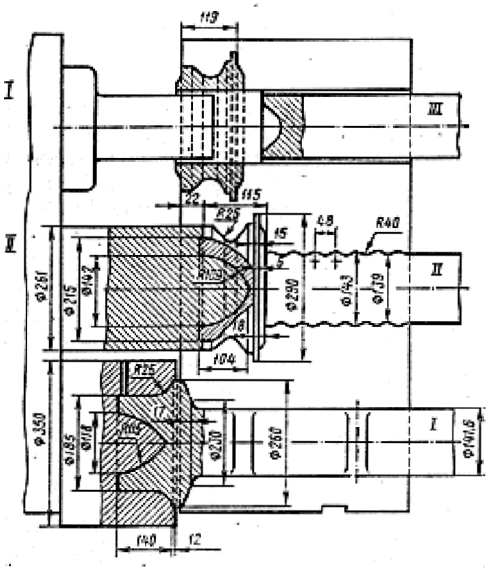


Рис. 46. Схема штампа для высадки муфты с прошивкой отверстия и отделением поковки от прутка

Для улучшения зажима заготовки полуматрицами зажимную часть ручья (рис. 47) выполняют определенной длины L с зазором Δ. Величину L можно уменьшить за счет применения рифленых ручьев.

Конструкцию и размеры наборных, формовочных, подъемных, пережимных и других ручьев высадочных штампов горизонтально-ковочных машин подбирают и рассчитывают в соответствии с действующими нормативными материалами в зависимости от требуемой конфигурации поковок.

Зачастую пуансоны, зажимные и формообразующие ручьи изготавливают сменными (рис. 48 и 49). Это позволяет повысить стойкость инструмента и облегчить переналадку горизонтально-ковочных машин.

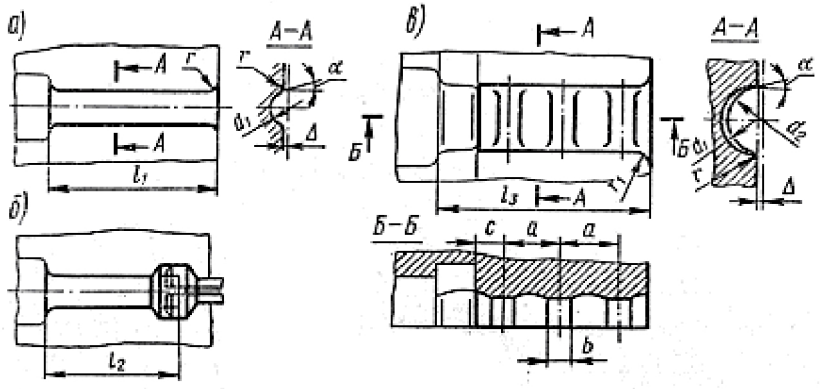


Рис. 47. Форма и размеры зажимных ручьев матриц горизонтально-ковочных машин: *а* – при штамповке от переднего упора, *б* – при штамповке с упор-клещами, *в* – при штамповке от переднего упора в ручьях с рифленой поверхностью

Конструкция сборных пуансонов приведена на рис. 50. Вставки матриц могут быть двух типов: в виде половин цилиндров – их крепят в полуматрице винтами (см. рис. 48) и прямоугольные – их устанавливают в соответствующих пазах полуматриц и крепят болтами или клином (рис. 51). Прямоугольные вставки применяют при

небольших размерах штампуемой поковки. Их можно применять многократно за счет изготовления ручья на двух и даже четырех гранях.

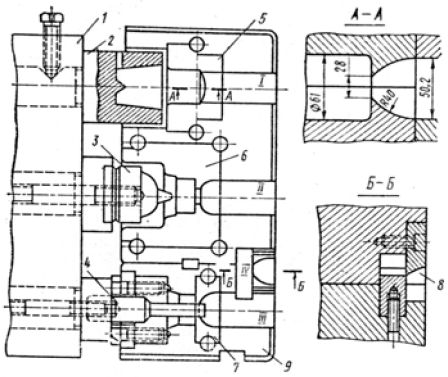


Рис. 48. Штамп со сборными пуансонами и матричными вставками для высадки втулки с фланцем: *1* – блок пуансонов; *2* – наборный пуансон; *3* – формовочный пуансон; *4* – просечной пуансон; *5* – наборная вставка; *6* – формовочная и пережимная вставки; *7* – просечная вставка; *8* – отрезные ножи (для отрезки дефектного прутка); *9* – блок вставок

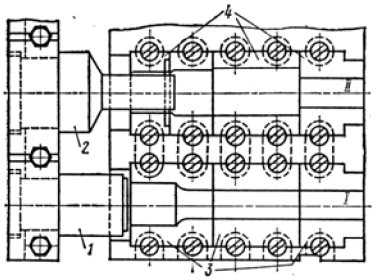


Рис. 49. Штамп со сменными матричными вставками для высадки головки тяги и обрезки облоя; *1* – пуансон I перехода (набор); *2* – пуансон II перехода (обрезка облоя); *3* – вставки матрицы I перехода; *4* – вставки матрицы II перехода

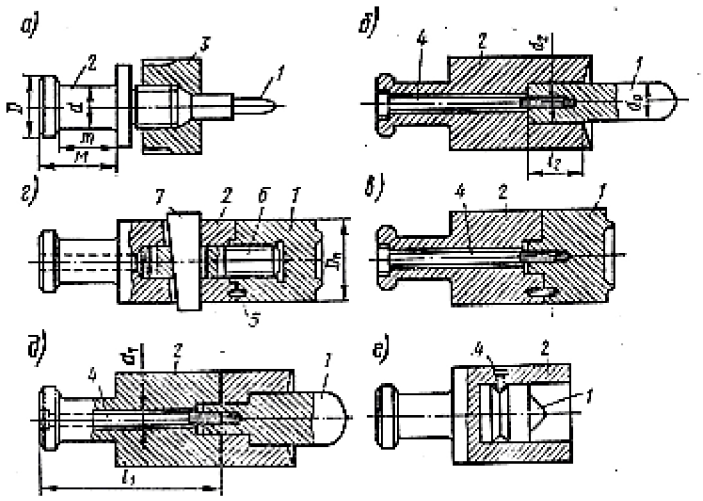


Рис. 50. Сборные пуансоны горизонтально-ковочных машин: *а* – прошивной пуансон для прошивки отверстий диаметром менее 80 *мм*; *б* – прошивной и формующий пуансон при диаметре поковки $D_п$ менее 80 *мм* и $D_п$ d > 1,5; *в*, *д* – то же, при $D_п$ = 80–160 *мм* и небольшой длине прошиваемого отверстия; *г* – формующий пуансон при $D_п$ > 160 *мм*; *е* – наборный или формующий пуансон с внутренним вкладышем; *1* – прошивной или формующий вкладыш; *2* – пуансон; *3* – накладная гайка; *4* – болт; *5* – штифт; *6* – штырь; *7* – клин

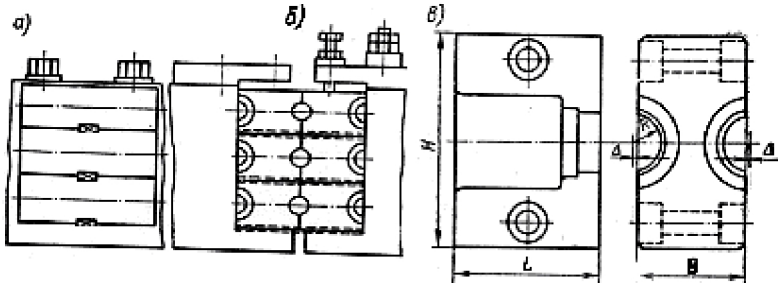


Рис. 51. Схемы крепления стяжными болтами (*а*), зажимными болтами (*б*) и конструкция (*в*) прямоугольных матричных вставок горизонтально-ковочных машин

Обрезные штампы

При их изготовлении обычно применяют кованые заготовки. Обработку пуансонов с хвостовиками в форме «ласточкина хвоста»

начинают строганием на поперечно-строгальном станке лобовой поверхности, затем строгают хвостовую и фронтовую поверхности. На фронтовой поверхности размечают форму хвостовика. Хвостовую часть обрабатывают на строгальном станке, затем фрезеруют режущий контур на вертикально-фрезерном станке. Правильность обработки проверяют шаблоном. Цилиндрические и прошивные пуансоны обрабатывают на токарных станках.

Обрезные матрицы со сложным контуром изготавливают теми же способами, что и матрицы для прессования. Для упрощения изготовления матриц их изготавливают сборными. При горячей обрезке пуансон-матрицу изготавливают по чертежу горячей штамповки, а при холодной обрезке – по чертежу холодной штамповки. Слесарную доводку пуансона и матрицы для горячей обрезки производят по отливке (слепку) с окончательного ручья штампа. Доводку пуансона и матрицы для холодной обрезки осуществляют по отштампованной детали из партии, подлежащей обрезке.

Съемники штампов обычно представляют собой подобие рамок, охватывающих пуансоны, которые изготовляют из толстолистового проката фрезерованием и строганием и пригоняют по соответствующим пуансонам.

При горячей штамповке штучных заготовок разделительные операции производят для обрезки облоя и пробивки отверстий, при штамповке от прутка или многоштучной штамповке – для отделения готовых поковок от прутка или друг от друга. В первом случае для выполнения разделительных операций применяют специализированные обрезные и универсальные кривошипные прессы. Иногда обрезку облоя и пробивку отверстий производят на горизонтально-ковочных машинах. Для выполнения разделительных операций во втором случае в штампах паровоздушных штамповочных молотов и горизонтально-ковочных машин монтируют специальные отрубные ножи.

На рис. 52 представлены конструктивные схемы обрезных и пробивных штампов простого действия (за один ход пресса выпол-

няется одна операция). Они отличаются друг от друга способом удаления поковки и облоя. Так, на схеме, показанной на рис. 52, *а*, поковку удаляют через окно в столе пресса; на схемах, представленных на рис. 52, *в*, *г*, – через окно в нижней плите штампа или в промежуток между брусьями. У пробивного штампа предусмотрен съемник; с его помощью поковку снимают с пуансона при обратном ходе ползуна пресса (рис. 52, *б*). При мелкосерийном производстве поковок матрицу накладками крепят непосредственно к столу пресса.

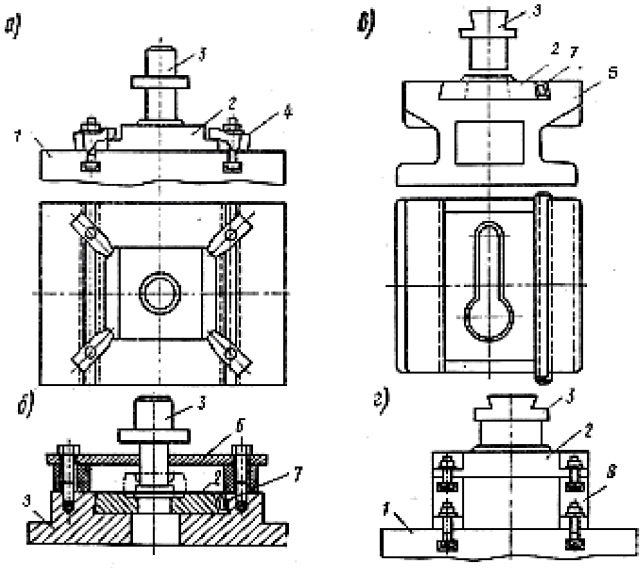


Рис. 52. Конструктивные схемы обрезных штампов: *а* – для обрезки облоя и удаления поковки через окно в столе пресса (крепление пуансона винтом, матрицы – накладками); *б* – для прошивки отверстий (в верхней части расположен съемник); *в* – для обрезки облоя и удаления поковки через окно штампа (крепление пуансона и матрицы клиновое; *г* – для обрезки облоя и удаления поковки в промежуток между брусьями (крепление пуансона клиновое, матрицы – болтами); *1* – стол пресса; *2* – матрица; *3* – пуансон; *4* – накладка; *5* – штамп; *6* – съемник; *7* – клин; *8* – брус

При массовом производстве поковок обычно применяют матрицы более совершенной конструкции. Хорошо зарекомендовали себя секционные (изготовленные из нескольких частей) матрицы,

фиксируемые специальными штырями; целесообразно также применять штампы с направляющими колонками (рис. 53). Штампы с направляющими колонками, расположенными с тыльной стороны и по оси, применяют для обрезки круглых в плане поковок, а с колонками, расположенными по диагонали штампа, для обрезки поковок удлиненной формы. За счет применения пружинных съемников в пробивных штампах достигают улучшения условий съема поковок и повышения производительности труда.

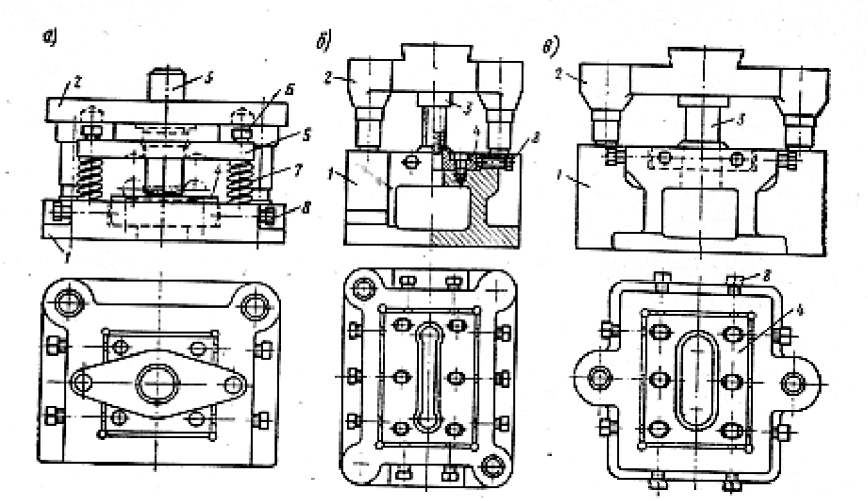


Рис. 53. Конструктивные схемы обрезных и прошивных штампов с направляющими колонками и секционными матрицами: *а* – направляющие колонки расположены в тыльной части штампа, а штамп снабжен пружинным съемником; *б* – направляющие колонки расположены по диагонали штампа; *в* – направляющие колонки расположены по оси штампа; *1* – нижний штамп; *2* – верхний штамп; *3* – пуансон; *4* – матрица; *5* – съемник; *6* – упор; *7* – пружина; *8* – болт

В том случае, если после штамповки поковки необходимо одновременно выполнить несколько операций (обрезку и пробивку, обрезку и правку и т. п.), применяют комбинированные штампы последовательного (рис. 54) и совмещенного (рис. 55) действия. В комбинированных штампах последовательного действия каждую операцию выполняют в отдельном ручье, а в комбинированных

штампах совмещенного действия в одном ручье за один ход ползуна пресса одновременно производят обрезку и правку поковок.

Рис. 54. Обрезные штампы последовательного действия: *а* – для обрезки, облоя и пробивки отверстий; *б* – для обрезки облоя и правки длинной поковки; *1* – нижний штамп; *2* – верхний штамп; *3* – пуансоны; *4* – матрицы; *5*, *6* – правочные вставки; *7* – съемник; *8* – буферное устройство

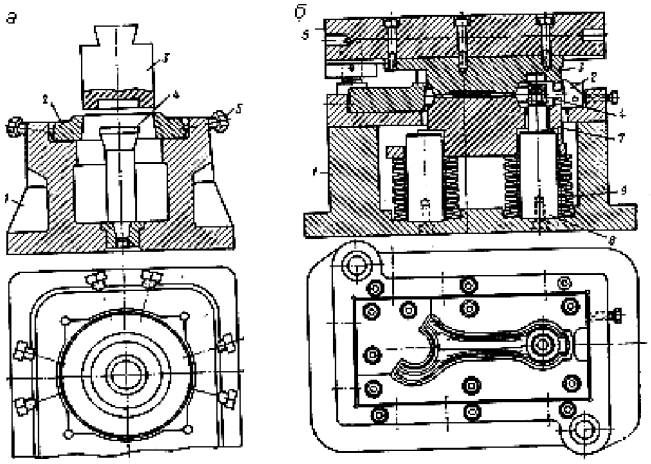


Рис. 55. Обрезные штампы совмещенного действия: *а* – для обрезки облоя и прошивки отверстия (с ручным подъемом прошивня); *б* – для обрезки облоя и прошивки зева в поковке шатуна (с буферным устройством); *1* – нижний штамп; *2* – матрица, *3* – обрезной пуансон; *4* – прошивень; *5* – болт; *6* – верхний штамп; *7* – прижим; *8* – упор

Обычно пакет штампа последовательного действия для поковок малых и средних размеров сложной конфигурации включает устройства для обрезки облоя и пробивки отверстий (рис. 54, *а*). В том случае, если после обрезки облоя необходимо производить операции правки или гибки, в пакете обрезного штампа размещают соответствующий ручей (рис. 54, *б*). При этом вставку правочного (гибочного) ручья устанавливают на амортизаторах (с тарельчатыми пружинами или буферным устройством).

В штампе совмещенного действия, показанном на рис. 55, *а*, в начале хода ползуна пресса пуансоном *3* и матрицей *2* производят обрезку облоя поковки, затем прошивнем *4* пробивают отверстия; в конце хода ползуна пуансоном *3* выполняют правку. В штампе, приведенном на рис. 55, *б*, обрезку облоя производят пуансоном *3* и матрицей *2*, пробивку отверстий – прошивнем *4*; в конце хода ползуна пресса также выполняют правку поковки (пуансоном *3*, прижимом *7* и буферным устройством *9*). Конструктивное исполнение буферных устройств обрезных совмещенных штампов показано на рис. 56.

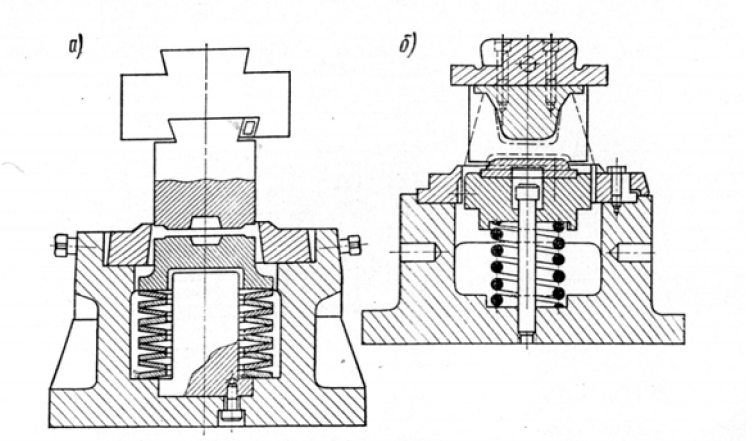


Рис. 56. Буферные устройства обрезных штампов совмещенного действия с тарельчатыми (*а*) и спиральными (*б*) пружинами

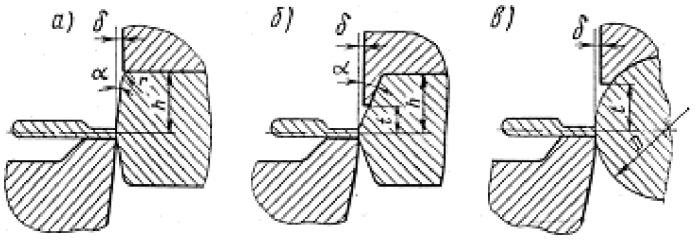


Рис. 57. Конструктивные элементы обрезных пуансонов *а* – плоских толкающих; *б* – плоских охватывающих; *в* – сферических охватывающих

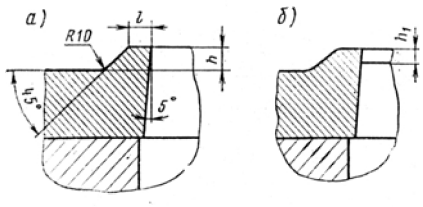


Рис. 58. Конструктивные элементы обрезных матриц с острой (*а*) и тупой (*б*) режущими кромками

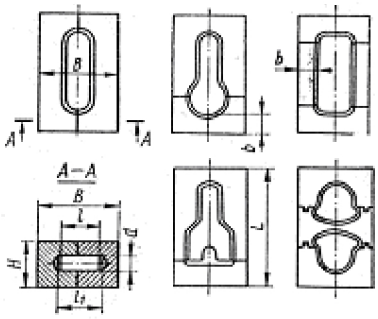


Рис. 59. Конструктивное исполнение обрезных секционных матриц

Конструктивное исполнение круглых обрезных и пробивных пуансонов представлено на рис. 60. Применение сменного рабочего инструмента обеспечивает экономию штамповой стали и оперативную переналадку штампа; последнее особенно существенно при

мелкосерийном производстве поковок. При применении пуансонов сложной конфигурации (для обрезки поковок типа рычагов, шатунов и т. п.) их крепежную часть изготавливают прямоугольной (для крепления винтами) или с хвостовиком (для крепления клином).

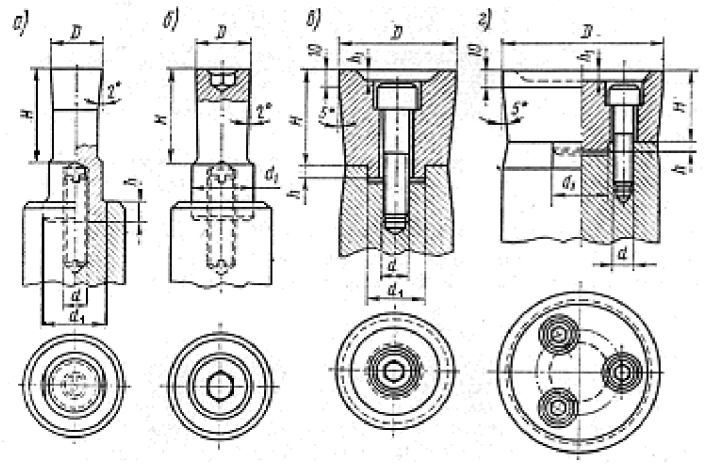


Рис. 60. Составные пуансоны: *а*, *б* – крепление на резьбе с помощью соответственно гаечного и торцового ключей: *в*, *г* – прошивную вставку крепят винтами, расположенными соответственно в центре и по окружности

Штампы холодной штамповки

Технология изготовления штампов холодной штамповки включает следующие этапы:

- получение заготовок;
- механическая обработка заготовок;
- слесарная обработка рабочих деталей штампов;
- термическая обработка деталей штампов;
- шлифование и доводка рабочих деталей;
- сборка, испытание и отладка штампов.

При заготовке деталей штампов, изготовляемых из инструментальных, углеродистых и легированных сталей, выполняют следующие операции: отрезание материала от плиты или полосы (дисковой пилой, газовым резаком и т. д.), ковка, изотермический

отжиг, строгание или фрезерование, обтачивание по диаметру, нормализация или высокий отпуск, черновое шлифование поверхностей. Далее следует обработка заготовки по чертежу.

Термическая обработка заготовок обеспечивает лучшую обрабатываемость их на последующих операциях, уменьшает деформации при закалке и повышает стойкость рабочих частей штампов. Чтобы устранить поверхностные напряжения, возникающие в результате грубой механической обработки, заготовки из легированной стали подвергают высокому отпуску, а заготовки из инструментальных сталей – нормализации.

Одними из наиболее ответственных деталей штампов являются пуансоны и матрицы. Обработка матриц в зависимости от формы и размеров, указанных в чертеже, может включать следующие операции: координатное растачивание, контурное фрезерование, фасонное строгание, долбление отверстий, токарная обработка (обтачивание, растачивание), доводка, полирование, шлифование, электроискровая, электроэрозионная и ультразвуковая обработка фигурных контуров и полостей. Возможно также изготовление рабочей части матриц методом прошивки мастер-пуансоном. Матрицы со сложным контуром профильного окна рекомендуется делать составными, как бы разрезая цельную матрицу на части, которые в отдельностии можно легко обработать после закалки и затем собрать и заключить все части в стальную незакаленную обойму.

Изготовление пуансонов включает следующие основные операции: отрезка заготовки, предварительная механическая обработка, черновое шлифование, чистовое шлифование профиля, доводка профиля, заточка. Цилиндрические пуансоны для вырубки – пробивки круглых контуров изготовлять несложно. Их обрабатывают на токарных станках, закаливают, шлифуют на круглошлифовальных или универсально-шлифовальных станках, доводят (полируют) рабочую поверхность и затачивают (прошлифовывают) режущий торец.

Обработка пуансонов, имеющих фасонный профиль, гораздо сложнее: контур пуансонов предварительно обрабатывают на металлорежущих станках по разметке на дальнейшую обработку, затем делают оттиск контура по закаленной и окончательно доведенной матрице и по оттиску изготавливают пуансон с учетом необходимого зазора между пуансоном и матрицей, после этого закаливают пуансон и окончательно доводят его рабочую часть. Пуансонодержатели, съемники, направляющие и другие нестандартные детали штампов изготавливают по подобным технологическим процессам изготовления матриц и пуансонов. Верхнюю и нижнюю плиты штампа обрабатывают в следующей последовательности: строгание плоскостей; сверление и расточка отверстий под колонки, втулки, транспортировочные штыри. Направляющие колонки и втулки изготовляют на токарном станке, затем их цементируют, закаливают и шлифуют.

7.3. ОСОБЕННОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Деформирующий инструмент изготавливают в инструментальных цехах. На крупных заводах может быть несколько цехов, специализирующихся на отдельных видах инструмента или видах обработки: механический, термический. На предприятиях средней мощности инструментальное хозяйство состоит из инструментального цеха и инструментальных участков в основных производственных цехах. Инструментальные участки в основных цехах выполняют текущий и средний ремонт.

Производство инструмента является сложным технологическим процессом: как правило, требуется повышенная точность изготовления. Оборудование для изготовления инструмента должно быть разнообразным, квалификация рабочих высокая. Помимо станочников в изготовлении инструмента принимают участие слесари-инструментальщики, которые выполняют наиболее сложные работы по разметке, доводке и испытанию инструмента. Трудоем-

кость слесарной работы – обработки инструмента – составляет 30–40% общей трудоемкости.

Изготовление инструмента начинается с чертежа инструмента и его отдельных деталей. Технологический процесс изготовления инструмента должен обеспечить необходимую последовательность операций, с тем чтобы получить требуемую точность инструмента, чистоту его установочных и рабочих поверхностей при условии оптимальной загрузки оборудования, рабочей силы, расхода материалов. Выбор рационального варианта целесообразно осуществлять с помощью математической модели, основанной на линейном программировании.

В процессе эксплуатации инструмент разрушается. Его подвергают ремонту. Ремонт инструмента чаще всего заключается в восстановлении правильной формы и размеров. Восстановление деформирующего инструмента осуществляют расточкой, наплавкой, пластическим деформированием. Выбор способа восстановления зависит от преобладающего вида разрушения, материала инструмента и т. п. Расточкой на прежний размер восстанавливают, например, волоки, в случае уменьшения размеров канала в результате пластической деформации поверхностных слоев (образование наплыва). На больший размер растачивают изношенный инструмент. Наплавка является более универсальным способом при восстановлении инструмента. В качестве наплавочных материалов используют порошковую проволоку, создается прочный поверхностный слой.

Различают следующие виды ремонтов: текущий, средний и капитальный. Текущий ремонт заключается в устранении таких мелких дефектов, как заточка режущих кромок штампа, зачистка рабочих поверхностей матриц, пуансонов, волок. Средний ремонт связан с частичной разборкой штампа и с заменой некоторых рабочих частей. Капитальный ремонт связан с полной разборкой штампа и заменой разрушенного инструмента.

Для анализа факторов, влияющих на стойкость инструмента при эксплуатации, и для определения мероприятий, повышающих стойкость, необходимо вести учет стойкости.

Организация систематического наблюдения за стойкостью инструмента должна предусматривать не только статистический учет стойкости, но и возможность изучения причин разрушения инструмента.

По данным паспортов на инструмент периодически составляются сводки стойкости инструмента. На основе этих сводок и их анализа разрабатываются мероприятия, обеспечивающие высокую стойкость и нормальные условия эксплуатации инструмента.

ПАСПОРТ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ШТАМПА

Предприятие _____ паспорт (штамп) №_____
Тип штампа _____
Операция _____ Шифры (изделия и детали) _____
Масса _____ Габаритные размеры изд. _____Закр. высота _____
№ чертежа штампа _____ Дата конструирования _____
Ф.И.О. конструктора, наименование бюро _____
Стоимость изготовления _____
Замечания по технологичности изготовления _____
_____ Дата и подпись ОТК _____

Эксплуатация					Ремонт	
Дата выдачи	Дата возврата	Количество отштампованных деталей	Состояние штампа	Дата поступления	Дата ремонта	Сущность проведенного ремонта

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные этапы технологического процесса изготовления инструмента.

2. Способы получения заготовок для последующего изготовления деформирующего инструмента.

3. Как устраняется дендритная структура металла и повышается однородность структуры?

4. Какая структура материала инструмента наиболее предпочтительна?

5. Основные операции для изготовления валков.

6. Какие операции при изготовлении инструмента считаются окончательными?

7. Назовите особенности конструкции штампов для горизонтально-ковочных машин.

8. Какие преимущества имеет сборная конструкция основных рабочих элементов оснастки?

9. Какова структура инструментального хозяйства предприятия?

10. В какой последовательности изготавливают молотовые штампы?

11. Как изготовить многослойный контейнер для прессования изделий?

8. ВЫБОР МАТЕРИАЛА

8.1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Работоспособность инструмента во многом определяется правильностью выбора материала, из которого он изготовлен. Выбор материала, в свою очередь, зависит от назначения инструмента, условий работы, а также экономических соображений. На рис. 61 указаны марки стали и нормы твердости для основных деталей штампа выдавливания пазовой фрезы на высокоскоростном молоте. Наиболее нагруженные детали: пуансон *2*, матрица *4* и выталкиватель *5* изготавливаются из высоколегированной инструментальной стали 4Х4МВФС с твердостью 48-51 HRC. Крепежные детали *1*, *3*, *6*, *7*, *8* – из конструкционных сталей.

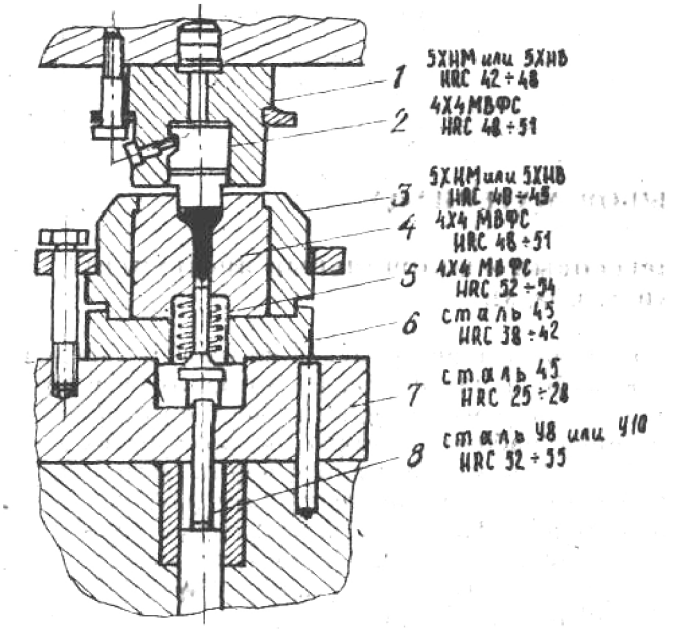


Рис. 61. Штамп для выдавливания пазовой фрезы на ВСМ

При выборе материала следует учитывать требования, предъявляемые к эксплуатационным и технологическим свойствам. К эксплуатационным относят свойства материала готового инструмента после окончательной обработки: *теплостойкость* – способность материала сохранять твердость при повышенных температурах; *разгаростойкость* – сопротивление термической усталости; *жаростойкость* – устойчивость против окисления при высоких температурах; *износостойкость*, *прочность* – сопротивление пластической деформации; *вязкость* – сопротивление хрупкому разрушению; *усталостную прочность*; *теплопроводность и твердость*.

К технологическим относят свойства материала, обеспечивающие возможность обработки инструмента с заданными эксплуатационными свойствами при минимальных затратах: прокаливаемость, характеризующую глубину закаленного слоя, обрабатываемость, коробление – деформацию деталей при термической обработке, склонность к обезуглероживанию, шлифуемость.

В качестве материала деформирующего инструмента, в основном, используются инструментальные стали. Обычно это заэвтектоидные и ледебуритные стали, структура которых после закалки и низкого отпуска «мартенсит + избыточнее карбиды». Для инструмента, требующего повышенной вязкости, например для штампов горячего деформирования, применяют доэвтектойдные стали, которые после закалки на мартенсит подвергают высокому отпуску для получения структуры троостита и даже сорбита. Кроме того, применяются керамические, металлокерамические материалы и жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта. К первым относятся окись алюминия Al_2O_3, окись циркония ZrO_2, частично стабилизированные добавками окислов магния или кальция. Металлокерамические материалы (керметы) представляют собой смесь металлической и керамической фаз. Наиболее широкое распространение получили так называемые твердые сплавы, состоящие из карбида вольфрама и кобальта типа ВК6–ВК20 (цифра указывает процентное содержание Со). Перечисленные материалы обладают

повышенными твердостью, теплостойкостью, сопротивлением смятию, истиранию и налипанию.

В последнее время для изготовления деформирующего инструмента стали применяться аморфные металлы и сплавы (металлические стекла) – новый класс материалов, отличающийся от обычных отсутствием упорядоченного расположения атомов, свойственного кристаллическим металлам и сплавам. Эти материалы обладают высокой механической прочностью, вязкостью, твердостью и высоким пределом текучести.

8.2. ПРЕССОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Условия работы прессового инструмента характеризуются значительными тепловыми и силовыми нагрузками на инструмент. При горячем прессовании температура нагрева заготовок из различных материалов составляет от 400 до 1600 °С, а рабочие слои

Таблица 8.1. **Материалы, применяемые для изготовления прессового инструмента**

Вид инструмента	Марка материала
Рабочие втулки контейнеров	38ХН3МФА, 5ХНВ, 3ХВ4СФ, 3Х3М3Ф
Пресс-штемпели	38ХН3МФА, 5ХНМ, 5ХНВ, 3Х2В8Ф
Пресс-шайбы	3Х2В8Ф, 38ХН3МФА, 3Х3М3Ф
Матрицедержатели	4Х3М2ВФГС, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС
Матрицы цельные и обоймы сборных матриц	3Х2В8Ф, 3Х3М3Ф, 4Х3М2ВФГС
Матричные вставки	3Х2В8Ф, ХН51ВМТЮКФР, ХН35ВТЮ, ЖС6К, Н80БМ, ВК8, ВК15, (а–АБА), (ZrO_2)
Иглы диаметром, *мм* <20	ХН62МВКЮ, 5Х3В3МФС, ЖС6К
20...35	5Х3ВМФС, 4Х3М2ВФГС, 3Х2В8Ф
35...50	3Х2В8Ф, 4Х4ВМФС, 3Х3М3Ф
50...70	4Х4ВМФС, 3Х3М3Ф
>70	3Х3М3Ф

инструмента могут нагреваться до 800 °С и выше. Давление на гравюру матриц достигает 1000 *мПа*.

С учетом условий эксплуатации к материалу предъявляются следующие требования: высокая теплостойкость; вязкость; высокая разгаростойкость; износостойкость; жаростойкость; высокая теплопроводность. Перечисленным требованиям отвечают материалы, приведенные в табл. 8.1.

8.3. ВОЛОЧИЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Волоки и оправки работают при высоких контактных напряжениях, локализованных на небольшом участке. За счет вибрации и колебания размеров протягиваемого изделия нагрузка на инструмент изменяется циклически. В связи с этим к материалу предъявляются следующие требования: высокая твердость; износостойкость; достаточная усталостная прочность (табл. 8.2).

Таблица 8.2. **Материалы, применяемые для изготовления волочильного инструмента**

Вид инструмента	Марка материала
Волоки и оправки для волочения труб и прутков	У8–У12, Х12М, ШХ15, ВК6–ВК20
Волоки для волочения прутков и проволоки	Х12М, ШХ15, ЭИ366, ВК6–ВК20
Волоки для волочения тончайшей проволоки	ВК6–ВК20, технические алмазы

8.4. ПРОКАТНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

В а л к и. По условиям эксплуатации валки разделяются на валки станов горячей и холодной прокатки. Условия работы валков станов горячей прокатки характеризуются циклическим характером действия рабочей нагрузки, значительным разогревом рабочего слоя (до 860 °С при прокатке титана). Холодная прокатка харак-

теризуется большими контактными напряжениями, приводящими к быстрому износу валков.

С учетом условий эксплуатации к материалу валков предъявляются следующие требования: высокая теплостойкость, высокая твердость, износостойкость, достаточная усталостная прочность (табл. 8.3).

Таблица 8.3. **Материалы, применяемые для изготовления валков прокатных станов**

Вид инструмента	Марка материала
Валки станов горячей прокатки: при прокатке мягких материалов; для обжимных станов, работающих при высоких давлениях и температурах; при прокатке труднодеформируемых материалов	 СЧ30, СЧ35, СЧ40, 40Х, 50ХН 40Х, 50ХН, 60ХН, 50Х 3Х2В8Ф
Валки станов холодной прокатки: рабочие опорные	 9Х, 9ХФ, 9Х2, 9Х2МФ, ШХ15, ВК8 9Х, 9ХФ, 70, 55ХГ, 45ХНВ

8.5. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

К материалу штампов холодного деформирования предъявляют следующие требования:

– высокая прочность, так как в процессе работы штампы испытывают большие усилия и ударные нагрузки;

– высокая твердость, поскольку процессы, например, вырубки, пробивки можно выполнить лишь при условии, что твердость материала инструмента значительно выше твердости обрабатываемого материала;

– износостойкость, так как долговечность работы штампов холодного деформирования в основном зависит от степени истирания;

– достаточная вязкость.

Штамповые стали должны обладать также особыми технологическими свойствами. К ним относятся: хорошая обрабатывае-

мость резанием и давлением, малая чувствительность к перегреву, малая деформация деталей при термической обработке, небольшая чувствительность к обезуглероживанию, хорошая прокаливаемость, хорошая шлифуемость. Перечисленным требованиям отвечают определенные марки инструментальных сталей и материалы (табл. 8.4).

Таблица 8.4. **Материалы, применяемые для изготовления деталей штампов и рекомендуемая твердость их термической обработки**

Деталь штампа	Марка материала	Твердость	
		матрицы	пуансона
Пуансоны и матрицы для вырубки и пробивки:			
простой формы	У10А, ШХ15, Х12М		
	8Х4В2С2МФ (ДИ37), ВК20, ВК8, Х12М	56–60	54–58
сложной формы	Х12М, Х6ВФ, ХВГ, Х12Ф1	56–60	56–58
Пуансоны и матрицы гибочных и формовочных штампов:			
простой формы	У8А, МСЧ 32-52, ВК20, ВК8	54–58	52–56
сложной формы	У10А, Х12М, Х6ВФ, ХВГ, Х12Ф1	56–60	56–60
Пуансоны и матрицы вытяжных и отбортовочных штампов:			
простой формы	У10А, Х12Ф1, ВК8–ВК20, МСЧ 32-58	–	–
сложной формы	Х613Ф, Х12Ф1, специальный, термически обработанный чугун	–	–
Пуансоны и матрицы для листовой чеканки:			
простой формы	У8А, Х12Ф1	54–58	54–58
сложной формы	Х12М, Х6ВФ, 9ХС, ХВГ	54–58	54–58

Твердый сплав типа ВК8-ВК15 используют для армирования наиболее нагруженных частей деформирующего инструмента. В зависимости от назначения применяют различные конструкции инструмента: цельные твердосплавные (пробивные пуансоны, отрез-

ные втулки), сборные, состоящие из стального корпуса с запрессованной в него твердосплавной вставкой (матрицы для высадки и выдавливания), сборные, состоящие из стальной державки с припаянной или закрепленной диффузионной сваркой твердосплавной вставкой (матрицы и пуансоны для резки и пробивки, пуансоны для холодного выдавливания).

Детали корпуса штампа изготавливают из конструкционных материалов 35, 40, 45, 50, 40Х и 50Х.

8.6. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ

Штампы горячего деформирования. К материалу предъявляют следующие требования: высокая теплостойкость; высокая прочность; износостойкость; высокая разгаростойкость; вязкость. Требования, предъявляемые к технологическим свойствам материалов штампов горячего деформирования, в основном совпадают с аналогичными требованиями к материалам штампов холодного деформирования. Рекомендации по выбору материала для штампов горячего деформирования сведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5. **Матрицы, применяемые для изготовления штампов горячего деформирования**

Тип штампа	Марка материала
Молотовые штампы:	
малонагруженные	5ХНМ, 5ХНВ, 5Х2СФ
тяжелонагруженные	5Х2МФ, 4Х3ВМФ, 4Х5В2ФС, 4Х5МФС
Штампы высокоскоростных молотов:	
малонагруженные	4Х3ВМФ, 4Х5МСФ, 4Х5МФ1С
тяжелонагруженные	4Х5В2ФС, 4Х4ВМФМ, 5Х3В3МФС
Штампы высадочных прессов и ГКМ:	
мелкие пуансоны и матрицы	4ХВ2С, 5ХВ2С, 4Х4МВФС, 3Х3М3Ф
крупные пуансоны и матрицы	7Х3, Х4МФ, 5Х2ВМФС, 4Х5МФС, 4Х3ВМФ
Штампы радиально-обжимных машин:	
малонагруженные	5ХНМ, 5ХНВ, 7Х3, 40Х
тяжелонагруженные	4Х3ВМФ, 4Х5В2ФС, 4Х4МВФС (бойки) 4Х4МВФС, 4Х2В5ФМ, 5Х3В3МФС (оправки)

Продолжение табл. 8.5

Тип штампа	Марка материала
Вальцовочные штампы	У7, 7Х3, 5ХНВ, 4Х3ВМФ, 4Х4ВМФС, 4Х2СВ2МФ
Накатные и раскатные штампы	7Х3, 5ХНВ, 4Х3ВМФ (опорные и нажимные валки) 4Х2В5ФМ, 5Х3В3М (накатники и матрицы)
Открытые штампы гидравлических и кривошипных горячештамповочных прессов: мелкие штампы крупные штампы	 4Х5В2ФС, 4Х3ВМФ, 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС 5ХНМ, 5ХНВ, 5Х2ВМНФ (ДИ32), 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС
Закрытые штампы и штампы выдавливания кривошипных горячештамповочных прессов	5ХНВ, 3Х2В8Ф, 4Х4МВФС, 3Х3М3Ф, 4Х2В5ФМ, аморфные материалы
Обрезные, отрезные и прошивные штампы: малонагруженные тяжелонагруженные	 7Х3, 5ХНВ, 5ХНМ, 4ХВ2С 5Х3ВМФС, 4Х2В5ФМ, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС
Штампы горячей правки и калибровки	5ХНМ, 5ХНВ, 4Х3ВМФ, 4Х4МВФС
Штампы жидкой и изотермической штамповки, низкотемпературной термомеханической обработки	4Х5В2ФС, 4Х5МФС, 3Х2В8Ф, ЖС-3, ЖС-6, 5Х3В3МФС

Контрольные вопросы

1. Какие стали называют инструментальными?

2. Какие основные эксплуатационные свойства инструментальных сталей вы знаете?

3. Чем объясняются различия в выборе материала деформирующего инструмента в зависимости от его назначения?

4. Какие способы существуют для снижения расхода дорогостоящих материалов при изготовлении инструмента?

5. Основные стали для изготовления штампов холодной штамповки.

6. Основные стали для изготовления штампов горячей штамповки.

7. Как связаны свойства приповерхностного слоя и стойкость инструмента?

8. Указать пути повышения стойкости деформирующего инструмента на стадии его изготовления.

9. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

С учетом характера разрушения деформирующего инструмента задачу повышения стойкости того или иного вида инструмента следует решать в определенной последовательности:

– определение преобладающего вида разрушения;

– выделение участков инструмента, из-за которых инструмент выходит из строя;

– определение основных причин разрушения (конструкция инструмента, режим работы, материал и т. д);

– назначение мер повышения стойкости.

Преобладающий вид разрушения можно определить, например, по данным распределения инструмента в зависимости от признака разрушения (табл. 9.1).

Таблица 9.1. **Относительное распределение выбракованных штампов по виду разрушения, %**

Вид разрушения	Вид штампа		
	молотовые	КГШП	КГМ
Глубокие трещины (Т)	45	–	–
Деформация элементов гравюры (Д)	25	10	–
Износ (И)	30	15	–
Разгарные трещины (РТ)	–	10	75
Комплексное разрушение (Т + О + И + РТ + Д)	–	65	25

Стойкость молотовых штампов можно увеличить главным образом путем повышения прочности. Для штампов ГКМ требуются технические решения, направленные на то, чтобы затормозить процесс образования разгарных трещин. Прессовые штампы КГШП нуждаются в защите одновременно по всем трем разновидностям разрушения. Совершенствование конструкции инструмента

– один из путей повышения стойкости. Например, при конструировании штампов размеры облойного мостика выбирают из условия полного заполнения гравюры штампа деформируемым металлом при максимальном отходе металла в облой. Если стойкости штампа придается основное значение, то высоту мостика в ущерб экономии металла можно несколько увеличивать. Зачастую несущественное (с точки зрения конструкции) изменение формы инструмента в несколько раз повышает его стойкость. Например, увеличение переходной зоны у матрицы для прессования прутков из латуни позволило увеличить стойкость матрицы с 8 до 23 прессовок (рис. 62).

Чем проще конфигурация поковки, тем легче изготовить штамп, тем выше его стойкость. Это важное правило, продиктованное производственной практикой, не всегда учитывается конструкторами.

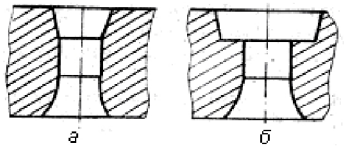


Рис. 62. Различная конструкция канала матрицы: *а* – 8 прессовок, *б* – 23 прессовки

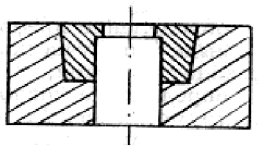


Рис. 63. Сборная матрица

С целью уменьшения температурных напряжений и задержки возникновения разгарных трещин инструмент для горячей обработки давлением перед формоизменением целесообразно подогревать. Наиболее изнашиваемые элементы инструмента целесообразно изготавливать в виде вставок из металлокерамических сплавов (рис. 63).

Хорошими способами повышения износостойкости рабочих поверхностей инструмента являются также хромирование, азотирование, борированне, цианирование, силицирование и сульфидирование, а также электроискровой способ упрочнения.

Основные пути повышения стойкости деформирующего инструмента могут быть разделены на конструкционные, технологические, эксплуатационные (табл. 9.2).

Таблица 9.2. **Основные пути повышения стойкости деформирующего инструмента**

Конструкционные	Технологические	Эксплуатационные
Рациональный выбор марки инструментального материала	Применение методов пластического деформирования и литья при получении заготовок инструмента из стали	Технический надзор за состоянием оборудования и инструмента. Рациональное решение вопроса смены и наладки инструмента
Применение сборных конструкций инструмента	Совершенствование методов механической обработки	Рациональный выбор технологии изготовления деталей, выбор характеристик деформируемого металла и подготовка его к обработке
Оптимизация геометрических размеров	Рациональный выбор вариантов термической и химико-термической обработки	Рациональный выбор смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ)
Применение системы САПР при проектировании	Упрочнение поверхности инструмента	Восстановление инструмента
Унификация и стандартизация инструмента	Применение комплексного метода контроля и исследования инструмента после обработки и износа	

Конструкция пути повышения стойкости

Материалы деформирующего инструмента в значительной степени определяют его стойкость. В то же время применение дорогостоящих материалов резко увеличивает затраты на инструментальную оснастку и себестоимость готового изделия, поэтому вы-

бор материала следует проводить с учетом всех особенностей данного процесса.

Под *сборной конструкцией инструмента* понимают:

– армирование наиболее тяжело нагруженных рабочих зон инструмента более износостойкими, чем гравюра, материалами;

– бандажирование деформирующего инструмента с целью формирования благоприятной схемы напряженного состояния при работе.

Повышение эффективности бандажирования достигается за счет применения более прочных материалов бандажных колец, методов термической, химико-термической обработки и упрочнения поверхностей сопряжения, повышения величины натяга за счет использования вставок из отдельных пришлифованных друг к другу клиньев, которые в сборе запрессовываются в бандаж, и бандажирования навивной ленты проволокой в напряженном состоянии. Последнее в сравнении с бандажированием кольцами имеет ряд таких преимуществ, как меньшая угроза разрыва при больших напряжениях, более равномерное распределение напряжений с максимальным напряжением в крайних витках обмотки, возможность большего количества смен бандажируемого инструмента.

Под *оптимизацией геометрических размеров инструмента* понимают выбор конфигурации его рабочей части, обеспечивающей минимальную неравномерность деформаций обрабатываемой детали, минимальное деформирующее усилие и т. д., а также основных габаритных размеров инструмента, оказывающих существенное влияние на температурный режим работы. В зависимости от выбранной функции цели при оптимизации конструкции инструмента в качестве параметра оптимизации, принимают такой фактор, влияние которого в данных условиях деформирования проявляется наиболее сильно.

Применение системы САПР при проектировании технологических процессов изготовления деталей методами ОМД позволяет решать задачи выбора материала инструмента и способа изготов-

ления, упрочнения и смазки, расчета переходов и выбора оборудования в комплексе с учетом достижения максимальной стойкости деформирующего инструмента.

Унификация и стандартизация инструмента позволяет обеспечить взаимозаменяемость элементов наладки, а также технологичность в изготовлении. Обычно унифицируются следующие элементы инструмента: посадочные места при постановке на оборудование, подкладные плиты, наружные размеры инструмента, допуски и посадки и т. д.

Технологические пути повышения стойкости

Применение пластического деформирования значительно повышает износостойкость инструмента за счет получения более равномерной мелкозернистой структуры, измельчения карбидной фазы и ее более равномерного распределения, а также формирования благоприятной волокнистой структуры. Наибольшее распространение находит холодное выдавливание инструмента, которое применяется для изготовления матриц холодной и горячей объемной штамповки, обрезных пуансонов, пуансонов для высадки винтов и др. инструмента. Значительно реже применяются: высокоскоростная штамповка с предварительным нагревом заготовок, редуцирование, высадка и холодное гидростатическое прессование.

Возможность изготовления высококачественного деформирующего инструмента, получаемого *литьем,* появилась в связи с разработкой методов, обеспечивающих достаточную точность изделия, качество поверхности и высокие показатели механических свойств. В сравнении с деформированной литая сталь обладает рядом преимуществ: более высокими показателями твердости и прочности при повышенных температурах, повышенным сопротивлением износу, улучшенными характеристиками разгарообразования, пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений.

Для изготовления отливок инструмента массой до 10 *кг* используют литье по выплавляемым моделям. Для относительно крупных отливок наиболее часто используют «шоу-процесс» (литье в керамические формы). Реже используется литье в корундовые формы (при изготовлении единичных штампов), литье в оболочковые формы.

Совершенствование методов механической обработки проводится в направлении получения оптимальных характеристик поверхности. Для этого в качестве финишной обработки целесообразно использовать алмазное шлифование, а также шлифование эльборовыми кругами. Это обеспечивает меньшее тепловыделение, что исключает структурные изменения поверхностного слоя и более низкую шероховатость рабочей поверхности. Износостойкость и усталостная прочность при этом повышаются.

Другим резервом повышения долговечности стального и твердосплавного инструмента является его обработка на финишных операциях резцами из поликристаллических сверхтвердых материалов (гексанит-Р, эльбор-Р, композит 05) вместо шлифования и точения твердосплавными резцами. Этим обеспечивается повышение микротвердости, возникновение остаточных сжимающих напряжений, отсутствие дефектов, большая дисперсность структуры обработанного поверхностного слоя.

Рациональный выбор вариантов термической, химико-термической обработки инструмента неразрывно связан с общей тенденцией совершенствования термической и химико-термической обработки, проявляющейся в повышении уровня автоматизации. Это обеспечивает высокое качество и высокую стабильность стойкости. Эффективным методом повышения стойкости инструмента, например, из стали ШХ15, является циклическая термическая обработка (ЦТО). Сущность процесса в повторении цикла закалка + одно- и многократные нагревы до температуры ниже A_{C3} с последующим резким охлаждением перед окончательной (традиционной) термообработкой. ЦТО позволяет получить мелкозернистую,

однородную дисперсную структуру с высокими механическими свойствами.

Для повышения стойкости штампового инструмента горячего деформирования разработана технология дифференцированной закалки. Технология включает общий нагрев до температур, обеспечивающих требуемую твердость основания штампа, последующий ускоренный односторонний высокотемпературный нагрев рабочей гравюры с охлаждением в масле. Перспективна термообработка инструмента в вакуумных установках с закалкой в потоке защитного газа при повышенном давлении, обеспечивающая получение изделий высокой размерной точности с неокисленным и необезуглероженным поверхностным слоем. Целесообразно применение индукционного нагрева для местной термообработки штампов горячей штамповки.

Новым направлением совершенствования поверхностной закалки инструмента является закалка при импульсном индукционном нагреве. Повышению стойкости кольцевых инструментов способствует отпуск в напряженном состоянии. Перспективен метод закалки инструмента взрывом. Повышение стойкости инструмента при обработке холодом, обеспечивается уменьшением содержания остаточного аустенита, высокой плотностью дисперсных карбидов в структуре, созданием в поверхностном слое сжимающих напряжений.

С помощью химико-термической обработки (ХТО) можно повысить поверхностную твердость, износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость, окалиностойкость деформирующего инструмента. Наиболее часто используются процессы ХТО, цементация, нитроцементация, азотирование, борирование, цианирование, оксидирование и диффузионное хромирование.

Цементация и нитроцементация применяются для повышения износостойкости инструмента из высоколегированных сталей Х12М, ЩХ15, 4Х5МФС, 3Х2В8Ф. Кроме того, данные виды ХТО

применяются для обработки вспомогательных деталей: направляющих колонок, втулок, пуансонодержателей и т. д.

Азотирование применяется для повышения износостойкости прессового инструмента, штампов объемной штамповки холодного и горячего деформирования после полного изготовления. Азотирование повышает твердость, а также способствует образованию на поверхности остаточных сжимающих напряжений. Азотированная поверхность сохраняет свою твердость после нагрева до 500...550 °С. Весьма эффективным является ионное азотирование, при котором нагрев детали происходит за счет бомбардировки ее поверхности ионами, ускоренными в области катодного падения потенциала сильноточного тлеющего разряда.

Борировавие применяется для повышения стойкости вытяжных, пробивных, вырубных штампов из сталей У8А, ШХ15, 5ХНМ, 7Х3, 40Х и др. При этом создается высокая микротвердость 1800–2000 HV для углеродистых, до 2500 HV для легированных сталей (ХВГ), до 2800 HV для сталей Х12М, Х12Ф1 и до 2800–3200 HV для быстрорежущих. Твердость сохраняется до 900 °С. Повышается также окалиностойкость. Недостатком борирования является повышенная хрупкость слоя.

Цианирование – цианированный слой имеет повышенную теплостойкость и износостойкость при меньшем налипании металла, более низкий коэффициент трения, повышенный предел выносливости.

Оксидирование выполняют при 400–450 °С после низкотемпературного цианирования, азотирования или нитроцементации. Оксидирование улучшает внешний слой деталей и повышает их стойкость. Окисная пленка непрочно сцеплена с металлом, поэтому ее главная роль – защита от коррозии при хранении инструмента.

Диффузионное хромирование – окончательная операция, выполняемая после ионного азотирования детали. Хромированию подвергаются пуансоны и матрицы формоизменяющих штампов из углеродистых сталей. При этом наряду с повышением твердости и

износостойкости резко снижается (в 2–3 раза) коэффициент трения. Следует отметить, что на качество значительное влияние оказывает качество исходной поверхности. В табл. 9.3 приведены данные по толщине, микротвердости и износостойкости диффузионных слоев.

Таблица 9.3. **Толщина δ (*мкм*), микротвердость HV(*ГПа*) и износ *m* на пути трения один километр (*мг/см*^{2}) диффузионных слоев**

Процесс	Режим насыщения	Упрочняемые стали											
		45			5ХНМ			7Х3			5Х3В3МФС		
		δ	HV	*m*	δ	HV	*m*	δ	HV	*m*	δ	HV	*m*
Борирование	900 °С, 4 ч	170	18,0	62	140	19,7	60	125	19,7	55	50	20,2	50
Хромирование	1100 °С, 6 ч	22	18,0	54	20	18,0	58	25	9,0	55	17	19,3	67
Цементация + закалка + отпуск (560 °С)	900 °С, 6 ч	950	3,5	592	800	4,8	302	600	5,0	237	350	5,5	100
Азотирование	520 °С, 20 ч	400	4,0	605	350	7,0	295	350	6,5	298	250	10,0	140
Закалка + отпуск (560 °С)	-	-	3,0	950	-	4,5	410	-	4,2	320	-	5,0	205

Упрочнение поверхности инструмента пластическим деформированием повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость инструмента из твердых сплавов, закаленных сталей, с наплавленной поверхностью, упрочненных ХТО или другими методами. В результате поверхностного деформирования повышается твёрдость и прочность, создаются благоприятные остаточные напряжения, уменьшается шероховатость. Алмазное, элборовое и гексанитовое выглаживание применяется для упрочняющей обработки поверхностей пуансонов и выталкивателей, реже торцовых и корпусных поверхностей высадочных матриц. Для повышения стойкости кузнечных штампов, износ которых преимущественно вызван истиранием рабочей поверхности,

рекомендуется упрочнение обработкой дробью, а также гидродробеструйное упрочнение (для инструмента сложной конфигурации).

Пробивные и высадочные матрицы и пуансоны, гибочный и другой прессовый инструмент подвергают электроискровому упрочнению. Сущность процесса заключается в многократном действии на поверхность детали импульсных электрических разрядов, вызывающих оплавление небольших участков поверхности. При этом происходит сверхскоростная закалка тонкого поверхностного слоя; азотирование – диссоциация азота воздуха с образованием атомарного азота, соединяющегося с материалом инструмента с образованием нитридов; цементация – соединение углерода, содержащегося в электроде, с материалом инструмента. Прочность и износостойкость деталей после обработки значительно повышается, а ударная вязкость и усталостная прочность снижаются. Повышается в несколько раз твердость, кавитационная, тепловая и эрозионная стойкость.

Лазерная обработка в основном используется для поверхностной закалки инструмента, однако перспективы ее применения значительно шире. С помощью лазерной технологической установки импульсного действия «Квант-16» упрочняется рабочая поверхность инструмента из закаленных сталей У8, ХВГ, 9ХС, Х125, Р6М5. Матрицы и пуансоны разделительных штампов в основном упрочняются по режущим кромкам. При лазерной поверхностной закалке в связи с незначительной поверхностью нагрева деформации практически отсутствуют. Характерная особенность структуры после лазерной закалки – способность сохранять твердость при нагреве в процессе трения. Кроме поверхностной закалки лазерная обработка может применяться для науглероживания, азотирования, борирования, легирования и наплавки.

Одним из перспективных направлений повышения стойкости инструмента является его упрочнение износостойкими покрытиями. Покрытие производится методом конденсации вещества с катодно-ионной бомбардировкой (метод КИБ) на установках «Булат»

и «Пуск», а также методом осаждения из газовой фазы. Методом КИБ наносятся различные по составу покрытия. Наибольшее распространение получили покрытия из нитрида и карбида титана, реже применяются покрытия из нитрида и карбида молибдена, циркония, ванадия, ниобия и др. Методом КИБ нельзя упрочнять внутренние, скрытые поверхности. Следует отметить также высокую начальную стоимость оборудования и сложность его эксплуатации.

Методом осаждения из газовой фазы наносятся покрытия из карбидов хрома, титана, ниобия, ванадия, циркония. После покрытия стальной инструмент подвергается упрочняющей термообработке. Метод отличается простотой и невысокой стоимостью применяемых устройств.

Перечисленными методами могут наноситься одно-, двух- и многослойные, комбинированные покрытия толщиной от 3 до 20 *мкм*. Комбинированные покрытия более эффективны, чем однослойные. Для оценки эффективности методов упрочнения в табл. 9.4 приведены данные стойкостных испытаний пробивных пуансонов из стали Р6М5.

Таблица 9.4. **Результаты стойкостных испытаний пробивных пуансонов из стали Р6М5**

Вид упрочнения	Средняя стойкость при износе, тыс. шт.	Коэффициент повышения стойкости
Не подвергавшиеся упрочнению	24	1,0
Выглаживание эльбором	62	2,6
Покрытие TiN на установке «Булат»	65	2,7
Выглаживание с гексанитом	50	2,1
Комбинированное покрытие на установке «Булат»	135	5,62
Лазерное упрочнение на установке «Квант-16»	62	2,6
Электроискровое упрочнение с электродом из TiC	72	3,0
Электроискровое упрочнение с электродом из WC	73	3,04

Перспективным видом упрочнения деформирующего инструмента является ионная имплантация. Сущность метода заключается во внедрении азота, кислорода, бора, редкоземельных и других элементов в поверхностный слой детали потоком ионов с энергией от нескольких десятков до нескольких сотен килоэлектроновольт. Обработка ионами, в отличие от метода КИБ, выполняется при низкой температуре, что не вызывает изменений свойств и размеров обрабатываемой детали

Применение комплексного метода контроля и исследования инструмента после обработки и износа в основном направлено на изучение свойств приповерхностного слоя. Оцениваются следующие характеристики: качество обработки инструмента, шероховатость поверхности, точность размеров и геометрические погрешности формы (овальность, гранность, волнистость и т. д.), твердость, величина наклепа L, остаточные напряжения, микроструктура, химический состав и некоторые другие. Контроль шероховатости поверхности после обработки и износа проводится с помощью эталонов шероховатости; микроскопа МИС-11, профилографа-профилометра завода «Калибр», на приборе «Surtronic», а также бесконтактными методами с использованием приборов, работающих по методу светового сечения, теневой проекции, с применением растров и интерференции света.

Для контроля размеров инструмента используются метод микрометража и соответствующие средства: микрометры, индикаторы, оптиметры, предельные скобы, калибры, универсальные измерительные микроскопы. Расширение прецезионной обработки инструмента вызывает необходимость применения активного контроля электронных измерительных устройств, лазеров, малых ЭВМ и т. п.

Остаточные напряжения определяются с помощью следующих методов: механический, рентгенографический, аналитический, фотоупругости, тензометрический, интерферометрии и др. Методы исследования структуры и химического состава материала инструмента представлены в виде схемы (рис. 64).

Эксплуатационные пути повышения стойкости.

Технический надзор за состоянием оборудования и инструмента является средством продления срока службы деформирующего инструмента. К оборудованию предъявляются следующие основные требования: максимальная жесткость, минимальные зазоры в движущихся частях, балансировка движущихся масс для уменьшения вибрации, термическая стабильность при любых скоростях в важнейших узлах, минимальные отклонения от параллельности ползуна и подштамповой плиты, точность подающих устройств.

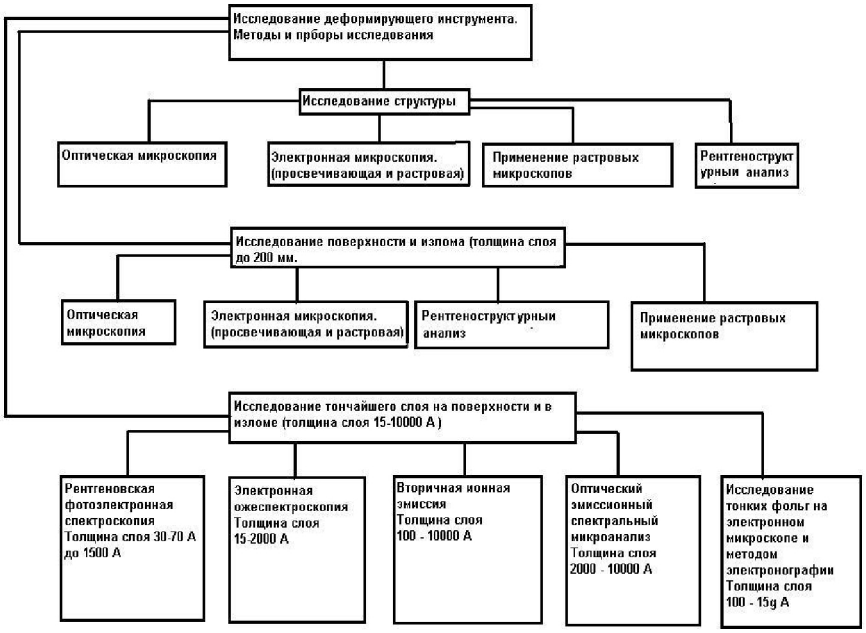


Рис. 64. Методы комплексного исследования структуры инструмента после отработки и износа

Кроме паспортов на деформирующий инструмент, в которых фиксируется вся информация по изготовлению и условиям эксплуатации, на предприятиях целесообразно иметь информацион-

ный банк по стойкости инструмента, что обеспечит оптимальную оперативность при анализе износостойкости.

На смену и наладку инструмента затрачивается много времени, что снижает эффективность применения высокопроизводительного оборудования. Кроме того, внезапное разрушение инструмента приводит к браку, поэтому важной является информация о состоянии инструмента, степени его износа, отсутствии разрушения. Перспективным направлением является рабочий контроль за состоянием инструмента с помощью различных датчиков, введение электросхем, которые сигнализируют о поломках, осуществляют контроль подачи металла. Датчики и электросхемы блокируются со схемой оборудования. Сокращение времени на смену и наладку инструмента производится в основном за счет автоматизации процесса смены, а также за счет применения выдвижных штамповых плит, компактных прижимных элементов крепления, оснащенных датчиками, контролирующими положение зажима. На многопозиционных автоматах время смены инструмента целесообразно сокращать за счет применения магазина.

Рациональный вывод технологии изготовления детали заключается в правильном выборе размеров заготовки, количестве переходов и промежуточных отжигов, степени деформации по переходам, температуры начала и конца обработки. Износостойкость деформирующего инструмента в значительной степени определяется штампуемостью деформируемого металла. Действие деформируемого металла на инструмент в основном определяется химико-механическими свойствами (состав, твердость, размер зерен структурных составляющих фаз), шероховатостью поверхности заготовки, контактирующей с инструментом. Например, увеличение в стали содержания углерода на 0,1% повышает предел текучести на 58,8...78,4 *МПа*, пластичность уменьшается. Структурные составляющие деформируемой стали оказывают абразивно-адгезионное воздействие на поверхность инструмента. Поэтому наилучшей для стали является структура с равномерно распределенными, хорошо

дисперсированными карбидами (например, структура зернистого перлита).

Подготовка металла к работе включает следующие операции: удаление окалины, получение заготовок с точными заданными размерами или весом, нанесение смазывающих покрытий.

Следует отметить, что твердосплавные штампы любого назначения обусловливают предъявление повышенных требований к обрабатываемому материалу.

Рациональный выбор СОЖ в настоящее время связан с трудностями из-за отсутствия строго научно обоснованных рекомендаций по их применению, а также теоретических предпосылок для их создания. Эффективность применяемой смазки во многом зависит от состояния деформируемого металла в объеме и на поверхности. Избыток смазки ухудшает качество детали и может привести к быстрому разрушению инструмента. Для нанесения смазки предпочтительны автоматические дозирующие устройства. Одним из перспективных направлений является разработка и применение смазок на основе синтетических полимеров.

Восстановление деформирующего инструмента осуществляют шлифованием, расточкой, пластическим деформированием. Стальной инструмент иногда может быть восстановлен путем хромирования. Наплавка является более универсальным способом восстановления и включает следующие операции: механическая обработка изношенной поверхности под наплавку; подогрев инструмента; наплавка; слесарная доводка размеров. Перспективно нанесение покрытий из твердых сплавов.

Контрольные вопросы

1. Конструкционные пути повышения стойкости деформирующего инструмента.

2. Приведите примеры повышения стойкости инструмента вследствие изменения его конструкции.

3. Эксплуатационные пути повышения стойкости деформирующего инструмента.

4. Как влияет химико-термическая обработка на стойкость деформирующего инструмента?

5. Связаны ли между собой конструкционные, технологические и эксплуатационные пути повышения стойкости инструмента?

6. Какие виды упрочения деформирующего инструмента существуют?

7. Как связаны свойства приповерхностного слоя и стойкость инструмента?

8. Указать пути повышения стойкости деформирующего инструмента на стадии его изготовления.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

– Азотирование 110
– Абразивный износ 53

В

– Валки 52
– Вязкость 97
– Волоки 39
– Вид контакта смазки с поверхностью 40
– Виды мех. обработки в изготовлении инструмента 57
– Выбор размеров и массы кубиков штампов 75

Г

– Граничные условия 27
– Гистограмма 5

Д

– Доводка 86
– Доминирующие факторы разрушения 13

Ж

– Жаростойкость 97

З

– Законы распределения стойкости 12
– Зажимные ручьи матрицы 85
– Затраты материала на штампы 67

И

– Износостойкость 97
– Износ инструмента 36

К

– Контейнер 49
– Корреляция 15
– Кривые упрочнения 44
– Крепления вставок 87
– Конструктивная схема обрезных и прошивных штампов 89

М

– Матрица планирования эксперимента 20
– Молотовые вставки 78

Н

– Надежность 11
– Необратимые деформации 41

П

– Поднутрение 56
– Пресс-шайба 50
– Предельная работа 44
– Прогнозирование стойкости инструмента 35

Р

– Разгарные трещины 26
– Разметка 73
– Разгаростойкость 97
– Разрушение инструмента 12
– Рациональный вывод 116
– Разрушение штампа 56

С

– Сборная конструкция 106
– Стойкость 4

Т

– Теплопроводность 97
– Тепловой износ 53
– Температурное поле 30
– Теплостойкость 97
– Технологические факторы стойкости 12

У

– Упрочнение 111
– Усталостная прочность 97

– Универсальный штамп 81

Ф

– Факторный эксперимент 18
– Формовка 82
– Факторы стойкости 12

Ц

– Цементация 110
– Цианирование 110
– Целевая функция оценки модели 66

Ш

– Штамп 54

Э

– Эмпирический закон 9
– Эксплуатационные факторы стойкости 12
– Электроискровой метод 61
– Электроимпульсная обработка 62
– Электрохимическая обработка 63
– Электрозвуковой метод 64

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

2. Артингер И. Справочник по инструментальным сталям и сплавам. – М., 1982.

3. Башлыков В. А., Морозов Н. П. Валки станов листовой прокатки авиационных материалов: учеб. пособие / Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1979. – 55 с.

4. Бельский Е. И. Стойкость кузнечных штампов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 240 с.

5. Бельский Е. И. и др. Упрочнение литых и деформирующих инструментальных сталей. – Минск, 1972. – 280 с.

6. Берин И. Ш., Днестровский Н. В. Волочильный инструмент. – М.: Металлургия, 1971. – 172 с.

7. Большов Л. Н.. Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 474 с.

8. Боровик Л. И. Эксплуатация валков станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1968. – 233 с.

9. Боровик Л. И. и др. Подготовка и обработка валков тонколистовых станов. – М.: Металлургия, 1984. – 105 с.

10. Будагьянц И. А., Карский В. Е. Литые прокатные валки. – М.: Металлургия, 1983. – 175 с.

11. Валки многовалковых станов / В. И. Полухин, М. Л. Бернштейн, А. Ф. Пименов и др. – М.: Металлургия, 1983. – 129 с.

12. Владимиров В. Н. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений. – М.: Высш. шк., 1974. – 431 с.

13. Горячий Д. В., Ефремов С. И. Эксплуатация и ремонт штампов листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1969. – 151 с.

14. Довнар С. А. Термомеханика упрочнения штампов объемной штамповки. – М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.

15. Драйгор Л. А. и др. Стойкость валков чистового холодного проката. – М: Машиностроение, – 1964. – 128 с.

16. Зубцов М. Е., Корсаков В. Д. Стойкость штампов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

17. Илюкович Б. М. Стойкость и расход прокатных валков. – М.: Металлургия, 1964. – 110 с.

18. Инструмент для горячего прессования тяжелых цветных сплавов / Ю. Т. Шевакин, Л. А. Нагайцев и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 168 с.

19. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. П. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. И. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

20. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. – М.: Машгиз, 1959.

21. Кухтаров В. И. Стойкость штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машгиз, 1959. – 90 с.

22. Манегин Ю. В., Анисимова И. В. Стеклосмазки и защитные покрытия для горячей обработки давлением. – М.: Металлургия, 1978. – 223 с.

23. Мендельсон В. С., Рудман Л. И. Технология изготовления штампов и пресс-форм. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.

24. Михалснко Ф. П. Стойкость разделительных штампов. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

25. Морозов А. П. Изготовление штампов для горячей штамповки. – М.: Машиностроение, 1965. – 187 с.

26. Надежность и долговечность валков холодной прокатки / В. П. Полухин, В. А. Николаев, М. А. Тылкин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.

27. Нефедов А. П. Конструирование и изготовление штампов. – М.: Машиностроение, 1973. – 408 с.

28. Палей М. М. Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов. – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с.

29. Повышение эффективности производства по эксплуатации прокатных валков / А. И. Маскалев и др. – М.: Металлургия, 1983. – 63 с.

30. Прикладная механика и расчет прокатных валков / П. И. Полухин и др. – Алма-Ата, 1977. – 208 с.

31. Производство и эксплуатация крупных опорных валков / П. П. Морозов, В. А. Николаев, В. П. Полухин, А. М. Легун. – М.: Металлургия, 1977. – 128 с.

32. Равин А. И., Сухадрев Э. Ш., Дудецкая Л. Р., Щербанюк В. Л. Формообразующий инструмент для прессования и волочения профилей. – Минск: Наука и техника, 1988. – 232 с.

33. Северденко В. П. и др. Валки для профильного проката. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.

34. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

35. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

36. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н. И. Яловой, М. А. Тылкин, П. И. Полухин и др. – М.: Высш. шк. 1973. – 631 с.

37. Трахтенберг Б. Ф. Стойкость штампов и пути ее повышения. – Куйбышев: Кн. изд.-во, 1964.

38. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Труден, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

39. Третьяков А. В. и др. Расчет и исследование прокатных валков. – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.

40. Хаяк Г. С. Инструмент для волочения проволоки. – М.: Металлургия, 1971. – 129 с.

41. Фотеев Н. К. Высокостойкие штампы. – М.: Машиностроение, 1965. – 257 с.

42. Хыбемяги А. И. Холодное выдавливание рельефных полостей технологической оснастки. – М.: Машиностроение, 1981. – 79 с.

43. Чертавских А. К., Белосевич В. К. Трение и технологические смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1968. – 364 с.

44. Штампы для горячего деформирования металлов / М. А. Тылкин, Д. И. Васильев, А. М. Рогалеви др. – М.: Высш. шк., 1977. – 496 с.

45. Электрохимическая обработка профильного прессового штампа / Р. П. Изаков и др. – М.: Металлургия, 1975. – 37 с.

46. Васильев Д. И. и др. Основы проектирования деформирующего инструмента. – М., 1984. – 223 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

1. Стойкость инструмента 7
1.1. Понятие стойкости 7
1.2. Основные виды и факторы разрушения инструмента 16
1.3. Определение зависимости стойкости инструмента от его параметров 17

2. Разгарные трещины 32
2.1. Природа образования разгарных трещин 32
2.2. Температурное поле инструмента 36
2.3. Прогнозирование стойкости инструмента 42

3. Износ 46
3.1. Виды износа 46
3.2. Технологические смазки 49

4. Необратимые деформации 54
4.1. Виды необратимых деформаций 54
4.2. Прогнозирование стойкости инструмента, выходящего из строя по необратимым деформациям 55
4.3. Методы исследования напряженного состояния инструмента 57

5. Характер разрушения инструмента 62
5.1. Прокатно-прессовое производство 62
5.2. Кузнечно-штамповочное производство 68

6. Методы изготовления инструмента 73
6.1. Механическая обработка 73
6.2. Методы пластического деформирования 75
6.3. Электрофизические и электрохимические методы обработки 76
6.4. Методы точного литья 81
6.5. Выбор оптимального варианта изготовления инструмента 82

7. Технология изготовления инструмента 87
7.1. Прокатно-прессовое производство 87
7.2. Кузнечно-штамповочное производство 89
7.3. Особенности инструментального хозяйства 112
8. Выбор материала 116
8.1. Инструментальные стали 116
8.2. Прессовый инструмент 118
8.3. Волочильный инструмент 119
8.4. Прокатный инструмент 119
8.5. Инструмент для холодной штамповки 120
8.6. Инструмент для горячей штамповки 122
9. Основные пути повышения стойкости деформирующего инструмента 125
Предметный указатель 141
Список использованной литературы 143

Учебное издание

Каргин Владимир Родионович, **Тлустенко** Станислав Федотович,
Горшков Юрий Сергеевич

ФОРМООБРАЗУЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Учебное пособие

Технический редактор
Редакторская обработка
Корректорская обработка
Верстка
Доверстка

Подписано в печать Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 8,0. Усл. кр.-отт. 8,72. Печ. л. 9,25
Тираж экз. Заказ ИП-

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34