

А. В. Алифанов, д-р техн. наук, ФТИ НАН Беларуси;
Н. В. Бурносков, канд. техн. наук; А. М. Милокова, аспирант ФТИ НАН Беларуси

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ КОНЦЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

The paper considers designs of end cutting tools intended for machining wood materials as well as the possibility of producing this tool using the method of hot plastic forming. The features characteristic of hot extrusion of wood-cutting end tools are discussed, the basic mechanisms of thermal processes that proceed in a billet during hot extrusion are found and relevant formulae are derived. The experimental technology presented is designed for production of a bimetallic end tool. It is based on the operation of extruding the workpiece of a tool tail part (40 X carbon steel) into a billet of a tool cutting part (P6M5 high-speed steel). This allows significant saving the consumption of expensive P6M5 steel. The process of hot extrusion makes it possible to obtain a complex tool profile as well as appropriate recesses required for brazing hard alloy plates without using machining. The hot extrusion method also permits ensuring high dimensional tool accuracy and high-grade surface quality.

Введение. Метод горячего пластического деформирования позволяет деформировать различные стали и сплавы, в том числе и малопластичные. Метод обеспечивает получение точных профильных заготовок, по конфигурации и размерам приближающихся к готовому инструменту. При этом обеспечивается не только повышение коэффициента использования дорогостоящей легированной стали, но и улучшение механических свойств инструмента и его режущей способности вследствие термомеханического воздействия на структуру стали в процессе деформации и последеформационной период. Последнее связано с измельчением и формоизменением исходного аустенитного зерна, что влияет на характер структурных превращений при отпуске, дисперсность и распределение карбидов.

Получение дереворежущего (цельного, биметаллического, в том числе твердосплавного) инструмента со сложной геометрией режущей кромки (инструмент для обработки отверстий, фасонный инструмент и др.) требует значительной механической обработки резанием, что неизбежно приводит к появлению отходов дефицитных материалов, составляющих больше 50%. Механическая обработка выполняется с применением дорогостоящего металлорежущего оборудования, которое в случае сложной фасонной поверхности заготовки требует разработки программного обеспечения. Для процесса характерна низкая производительность (как правило, единичное или мелкосерийное производство). Особенностью существующих способов изготовления цельного твердосплавного инструмента сложной формы является наличие в составе значительного количества пластифицирующих добавок (парафинов), улучшающих технологические свойства заготовки при механической обработке, но приводящие к повышенной усадке и искажению геометрических размеров

инструмента после спекания. Кроме того, производство мелкогабаритного режущего инструмента таким методом затруднено либо в ряде случаев вообще невозможно. Недостаточная прочность заготовок при механической обработке увеличивает процент брака при производстве инструмента.

Трудности, возникающие при изготовлении цельного твердосплавного инструмента, привели к широкому распространению напайного инструмента. Однако его работоспособность сильно зависит от качества пайки, правильного выбора материала державки, припоев и флюсов, режимов нагрева и охлаждения. В процессе пайки формируются остаточные напряжения, возникают трещины, являющиеся причиной выхода из строя более 20% твердосплавного инструмента. Пайка требует дополнительного расхода дорогостоящей электроэнергии для высокочастотных установок и печей с защитной атмосферой.

Разработанная технология комбинированного квазиизостатического формования концевой инструмента в цельном или биметаллическом исполнении позволяет повысить коэффициент использования материала с 0,5 до 0,7–0,9.

Схема всестороннего равномерного сжатия обеспечивает равномерное распределение плотности по всему объему прессовки, что значительно снижает внутренние остаточные напряжения и коробление после спекания и благотворно сказывается на стойкости инструмента, получаемого из твердого сплава.

Предлагаемый метод горячего пластического деформирования позволяет получать концевой инструмент сложной формы цельным или биметаллическим, концевая режущая часть которого изготавливается из быстрорежущей стали или твердого сплава, а остальная из традиционно используемых сталей.

Конструкции дереворежущего концевой инструмента. Наиболее распространенные

концевые инструменты, используемые в деревообрабатывающей промышленности (концевые фрезы и сверла), имеют цилиндрическую форму, а их конструкция включает режущую рабочую часть и хвостовик для крепления в державке. Формы инструмента показаны на рис. 1 и 2 [1].

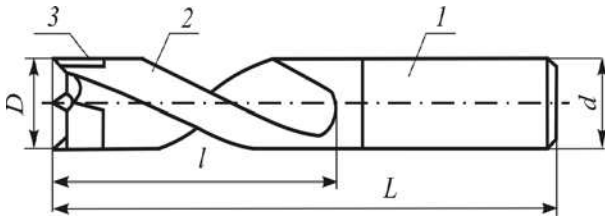


Рис. 1. Сверло спиральное:
1 – хвостовик сверла; 2 – режущая часть;
3 – упрочняющие элементы

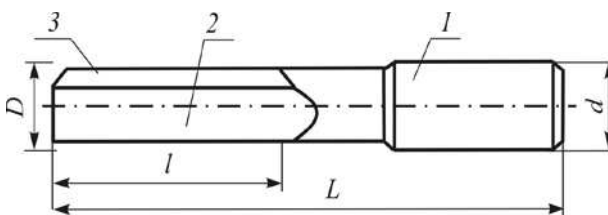


Рис. 2. Фреза концевая:
1 – хвостовик сверла; 2 – режущая часть;
3 – упрочняющие элементы

Значительная экономия может быть получена при изготовлении хвостовиков из дешевых конструктивных сталей, которая зависит от соотношения размеров $4/l$, d/D . Причем возможно получение формы заготовки как с последующим оснащением лезвий упрочняющими элементами (твердыми сплавами), так и биметаллических инструментов.

Основные факторы, влияющие на процесс горячего выдавливания концевого инструмента. Высокая точность формы и чистота получаемой поверхности при обработке давлением позволяет изготавливать инструмент без дальнейшей механической обработки его профиля и при минимальном съеме металла лишь на финишных операциях затачивания режущих кромок [2].

Формование осуществляется в специальном штампе с профильной матрицей, обеспечивающей получение инструмента как с открытым, так и закрытым с одного конца рабочим профилем [3].

Процесс деформации горячего металла путем объемной штамповки выдавливанием обычно осуществляют с использованием штампа, полость которого изготовлена таким образом, чтобы обеспечить плавное течение металла при ее заполнении, причем весь процесс течения материала должен происходить без образования надрывов и трещин. Для этого необхо-

димо учитывать влияние большого числа факторов, важнейшие из которых могут быть обобщены в следующие группы [3]:

- 1) конструктивные;
- 2) температурно-временные;
- 3) фрикционные.

Конструктивные факторы эффективности процесса горячего выдавливания включают в себя конструктивные элементы штампа (матрица, контейнер, пуансон), общие требования к проектированию которых должны учитывать возможность плавного течения деформируемого материала, заполнение рельефа формообразующего инструмента, рациональный выбор материалов для элементов штампа, точность изготовления сопрягаемых деталей и узлов, сменность изнашиваемых элементов и возможность унификации при их замене на другие типоразмеры.

К температурно-временным факторам процесса выдавливания профильных заготовок концевого режущего инструмента следует отнести факторы теплового взаимодействия нагретой заготовки и штампового инструмента в процессе их контакта при пластическом деформировании.

Известно, что быстрорежущие стали, часто применяемые в качестве основного материала для изготовления концевого режущего инструмента, относятся к термочувствительным, склонным к проявлению достаточных пластических свойств только в узком температурном интервале горячей обработки. Экспериментальные данные показывают, что таким диапазоном максимальной пластической деформации стали Р6М5 является интервал 1050–1100°C [3]. В связи с тем, что в результате контакта нагретой заготовки со штампом происходит теплопередача от заготовки через прослойку смазки к стенкам контейнера и матрице, теплосодержание ее уменьшается, температура заготовки может стать ниже оптимального температурного интервала пластичности деформируемого материалов. При этом общая величина тепловых потерь зависит как от граничных условий температуры поверхности контакта и условий теплопередачи, так и от времени процесса теплопередачи. Как показывает практика, при скоростном горячем выдавливании основная доля тепловых потерь заготовки обусловлена, в первую очередь, контактом ее с рабочей средой, особенно в начальной стадии деформирования, когда она находится в цилиндрическом приемнике (контейнере). Даже при кратковременном контакте (1–3 с), в зависимости от первоначальной температуры заготовки и состава смазки, тепловые потери могут достигать десятков, а иногда и сотен градусов.

Поэтому при эксплуатации штампа нельзя не учитывать влияние таких факторов, как ис-

ходная температура заготовки, время контакта заготовки со смазкой и штампом, теплофизические свойства заготовки, штампа и смазки, объем деформируемого материала и температура подогрева штампа [4]. Особую важность эти факторы приобретают при выдавливании профильных заготовок инструмента с внедрением в них в процессе формообразования хвостовиков из углеродистой стали [5]. В этом случае время контакта нагретой заготовки со штампом примерно вдвое больше, чем в случае обычного прямого выдавливания.

Факторы фрикционного характера определяют энергозатраты непосредственно при пластическом формообразовании, с одной стороны, и неравномерность деформированного состояния при пластическом течении – с другой. Снижению контактного трения способствует применение смазок, в той или иной мере разделяющих контактируемые поверхности деформируемого материала и формообразующего инструмента. При этом должна быть обеспечена достаточная термостабильность смазок при температурах горячей обработки. Таким образом, выдавленные смазки выполняют роль экранирующих прослоек как в механическом, так и в теплофизическом отношениях.

Механические и эксплуатационные свойства изделий, полученных горячей пластической деформацией, а также стойкость элементов штампа при деформировании во многом определяются температурным режимом обработки, который зависит от начальной температуры нагрева заготовки, времени переноса заготовки в штамп, геометрических параметров заготовки и инструмента, сил трения при деформации, теплофизических свойств материала в заготовке, штампа и смазки и т. д. Процессы теплообмена при горячем выдавливании существенно влияют как на тепловое состояние деформируемой заготовки, так и на изменение температурного поля предварительно подогретого штампового инструмента. Как показывает практика, основная доля теплотеря происходит в начальной стадии, когда время ее контакта со штамповым инструментом в десятки раз превышает время деформации при выдавливании (0,1–0,3 с). В связи с изменяющимся во времени температурным полем в рассматриваемой системе процесс теплообмена необходимо считать нестационарным, точное описание которого с изменяющимися теплофизическими свойствами и сложными граничными условиями имеет громоздкое решение, неприемлемое для инженерной практики. Поэтому при решении практических задач часто прибегают к экспериментально-аналитическому методу.

Особенности тепловых процессов при горячем выдавливании. Рассмотрим процесс те-

плопередачи при горячем выдавливании, схема которого приведена на рис. 3.

При решении задачи используем следующие допущения:

- 1) температурное поле в слое смазки одномерное;
- 2) контакт смазки с поверхностью заготовки – идеальный, а коэффициент теплообмена – постоянный;
- 3) основной формой переноса тепла в слое смазки является теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности контакта;
- 4) диссипацией энергии смазки при деформации можно пренебречь, т. к. она несравнимо мала в отличие от тепловой энергии, передаваемой смазке от нагретой заготовки.

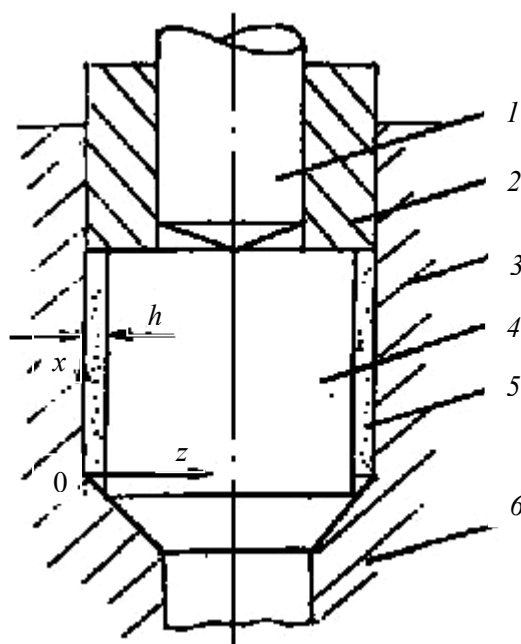


Рис. 3. Схема к расчету теплопередачи при горячем выдавливании:

1 – хвостовик; 2 – втулка; 3 – контейнер; 4 – заготовка; 5 – смазка; 6 – матрица

Пусть исходная температура слоя смазки будет T_c , контейнера – T_k , а заготовки – T_0 . Тогда условие задачи можно записать так [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad T(z, 0) = T_c;$$

$$T(0, t) = T_k, \quad T(h, t) = \varphi(t), \quad (1)$$

где a – температуропроводность смазки; $\varphi(t)$ – температурная функция, характеризующая изменение температуры в теле заготовки во времени и подлежащая определению.

Если допустить, что для какого-то момента времени $t^* \in [t_{j-1}, t_j]$, $\varphi(t) = \varphi_j = \text{const}$, то решение (1), полученное с помощью преобразования Лапласа, можно представить в виде [7]:

$$T_{j,zk} = T_{\infty} + (T_0 + T_c) \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at_j}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\operatorname{erfc} \frac{(2n-1)h-z}{2\sqrt{at_j}} - \operatorname{erfc} \frac{(2n-1)h^2+z}{2\sqrt{at_j}} \right] \cdot (\varphi_j - T_c) - \left[\operatorname{erfc} \frac{2nh-z}{2\sqrt{at_j}} - \operatorname{erfc} \frac{2nh+z}{2\sqrt{at_j}} \right] (T_k - T_c) \right\}, \quad (2)$$

где $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-z^2) dz$ – функция ошибок Гаусса.

$$T^* = \frac{T_0 + F_0 \frac{T_k + T_c}{2}}{F_0 + 1}. \quad (9)$$

Для определения $\varphi(t)$ используем уравнение теплового баланса:

$$Vc\gamma dT = -\alpha(T^* - T_c)FdT, \quad (3)$$

где T^* – текущая температура заготовки; V и F – объем заготовки и площадь ее боковой поверхности соответственно; c и γ – удельная теплоемкость и плотность материалов заготовки соответственно; α – коэффициент теплоотдачи.

Будем считать, что средняя температура смазки T_m во времени изменяется по линейному закону:

$$T_m = T_c + \frac{dT}{dt}. \quad (4)$$

Определив из (4) T_c и подставив его в (3), получим:

$$(CR + t)d\theta = -\theta dt, \quad (5)$$

где $C = c\gamma V$ – объемная теплопроводность; $R = \frac{1}{\alpha \cdot F}$ – термическое сопротивление; $\theta = T^* - T_c$ – избыточная температура.

Разделяя в (5) переменные и интегрируя, будем иметь выражение:

$$\ln \theta = -\ln(t + CR) + d, \quad (6)$$

где d – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Окончательно получим

$$\theta = \frac{\theta_c}{\theta_{0c}} = \frac{T^* - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{1}{F + 1}, \quad (7)$$

где $F_0 = \frac{t}{cR}$ – критерий гомохронности Фурье.

Таким образом, температура поверхности заготовки в любой момент времени охлаждения определяется из (7):

$$\varphi_{j,t} = T^* = \frac{T_0 + F_0 T_c}{F_0 + 1}. \quad (8)$$

Полагая, ввиду малости зазора между заготовкой и контейнером, $T_c = \frac{T_k + T_c}{2}$, окончательно получим

Для оценки достоверности полученных формул проведены экспериментальные работы по исследованию температурного поля в нагретой заготовке, охлаждаемой в результате контакта со смазкой и штампом. Процесс теплообмена был смоделирован в приспособлении, позволяющем регистрировать с помощью термопар распределение температурного поля по радиусу заготовки, помещенной в цилиндрический, со смазанной внутренней поверхностью, приемник после нагрева заготовки до необходимой температуры. Следует отметить, что наиболее существенный вклад в интенсивность изменения температуры поверхности заготовки при охлаждении вносит смазочная среда, состав которой обуславливает величину коэффициента теплообмена. Изменение температуры поверхности и внутренних слоев цилиндрической заготовки диаметром 30 мм, нагретой до $T_c = 1000^\circ\text{C}$ и охлажденной в смазочной графитомасляной среде, находящейся в зазоре между заготовкой и контейнером, показано на рис. 4.

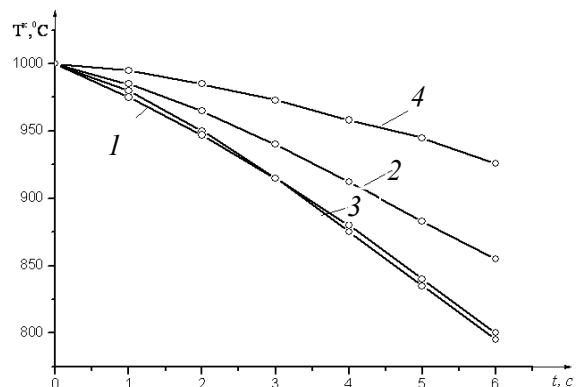


Рис. 4. Изменение температуры поверхности заготовки при охлаждении: 1, 2 – расчет; 3, 4 – эксперимент; 1 – без подогрева штампа; 2 – с подогревом до 300°C ; 4 – внутренние слои заготовки

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает достаточную близость результатов. Расхождение данных с увеличением времени охлаждения обусловлено тем, что при расчете был учтен подогрев штампа до 300°C , в

то время как при эксперименте подогрев контейнера не производили.

Экспериментальная технология получения концевого дереворежущего инструмента в биметаллическом исполнении. В ФТИ НАН Беларуси разработана экспериментальная технология получения биметаллического концевого инструмента, в основу которого положена операция образования соединения режущей и хвостовой частей путем их совместной деформации при выдавливании профильной режущей части через матрицу соответствующей конфигурации. Такой подход позволяет избежать многих негативных факторов, присущих методу получения неразъемного соединения сваркой трением, а также пайкой (применение экологически «грязных» компонентов, сложность, трудоемкость и т. д.).

Конструктивные элементы исходных заготовок должны одновременно учитывать как возможность прочного соединения в результате совместной деформации разнородных металлов, так и особенности процессов осадки, прошивки и выдавливания, последовательно или параллельно происходящих при образовании соединения.

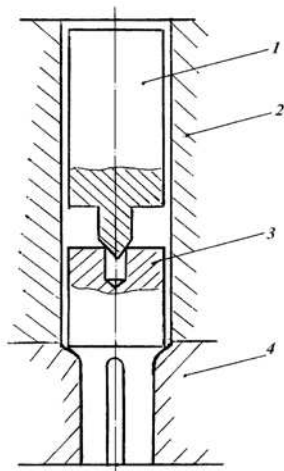


Рис. 5. Схема выдавливания биметаллического инструмента:
1 – хвостовик; 2 – контейнер;
3 – заготовка; 4 – матрица

На рис. 5 представлена схема выдавливания биметаллического инструмента в начальной стадии процесса. Нагретая до температур $1000\text{--}1050^\circ\text{C}$ заготовка 3 из быстрорежущей стали помещается в контейнере 2 на матрицу 4. На заготовку 3 устанавливается хвостовик 1 из углеродистой стали, имеющий наконечник для прошивки длиной l и диаметром d . Под воздействием усилия пуансона (на рисунке он не показан) хвостовик внедряется в нагретую заготовку и выдавливает последнюю через матрицу [8].

В процессе получения соединения при горячем выдавливании по этой схеме возможно

прохождение последовательно или параллельно нескольких операций обработки давлением: осадка нагретой заготовки до диаметра контейнера, осадка прошивающего наконечника длиной l , прошивка отверстия в нагретой заготовке, выдавливание заготовки через профильную матрицу, совместная деформация наконечника и заготовки при вхождении их в очаг пластической деформации. Последовательность той или иной операции определяется из условия наименьшего усилия. Используя известные из теории обработки металлов давлением зависимости удельных усилий от геометрических соотношений формообразующего инструмента, заготовки и хвостовика, можно рассчитать полное усилие выдавливания и подобрать соответствующие прессовое оборудование.

Закключение. В результате проведенных исследований можно рекомендовать различные схемы горячего пластического деформирования, конструкции формообразующего инструмента, подобрать соответствующий пресс для изготовления заготовок различных дереворежущих концевых инструментов (фрез, сверл и др.), в том числе в биметаллическом исполнении.

Литература

1. Типаж дереворежущего инструмента, выпускаемого и намечаемого к выпуску предприятиями Республики Беларусь: информ. справочник / А. В. Алифанов [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2003. – 136 с.
2. Северденко, В. П. Теория обработки металлов давлением / В. П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966. – 224 с.
3. Северденко, В. П. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента / В. П. Северденко, В. С. Мурас, Э. Ш. Суходрев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 254 с.
4. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
5. Горячая закрытая прошивка заготовки из быстрорежущей стали / В. П. Северденко [и др.] // Прогрессивные процессы обработки выдавливанием деталей инструментального производства: сб. тезисов X научно-технического семинара. – Таллин, 1975. – С. 85–90.
6. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
7. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач теплопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М.: Высшая школа, 2005. – 430 с.
8. Алифанов, А. В. Обработка давлением компактных и дискретных материалов / А. В. Алифанов. – Минск: Экоперспектива, 2004. – 370 с.