

Исследование динамики процесса электроэрозионного резания проволочным электродом-инструментом

к.т.н. доц. Овсянников Б.Л., к.т.н. доц. Ставицкая Н.Б.

МИЭМ НИУ ВШЭ

8(499)-235-20-87, obl_d@mail.ru, n.stavitskaya@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования динамики процесса электроэрозионного резания проволочным электродом-инструментом, ориентированные на решение задач управления.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, резание, инструмент, жёсткость, динамика, управление

Особенности задачи управления процессом электроэрозионного резания проволочным электродом-инструментом

Обычно под управлением процессом ЭЭО понимают управление величиной межэлектродного промежутка (МЭП), которая, как предполагается, изменяется в результате разрушения электродов под действием электрических разрядов, с одной стороны, и под влиянием перемещения электрода инструмента (ЭИ) с помощью привода подачи, с другой. При этом задача управления сводится к поддержанию такой скорости перемещения ЭИ, при которой скорость разрушения электрода детали (ЭД) максимальна при условии стабильного течения процесса обработки. Как известно, процесс ЭЭО имеет выраженный стохастический характер, и указанная задача управления решается с помощью введения различного рода обратных связей, использующих те или иные относительно информативные сигналы о течении процесса ЭЭО и о величине МЭП в каждый момент времени. Обычно при построении таких систем не делается особого различия между способами реализации ЭЭО. Однако опыт эксплуатации различных ЭЭ установок показывает существенное различие динамики процесса ЭЭО для различных видов обработки, например при микро ЭЭО, при изготовлении штамповой оснастки и деталей двигателей[1-3].

Способы реализации процесса ЭЭО можно подразделить на две группы, отличающиеся динамикой изменения МЭП:

способы ЭЭО с жёсткими электродами;

способы ЭЭО, у которых один или оба электрода не обладают достаточной жёсткостью, и силы, создаваемые процессом ЭЭО, достаточны для некоторого изменения величины МЭП.

Наиболее характерным представителем второй группы является способ электроэрозионного резания проволочным электродом-инструментом (ПЭИ) или вырезная электроэрозионная обработка (ВЭЭО). Задача управления процессом электроэрозионного резания (ВЭЭО) сводится к двум подзадачам:

управление перемещением проволочного электрода-инструмента (ПЭИ) в пространстве по заданной траектории;

управление скоростью перемещения ПЭИ.

Первая, траекторная задача решается с помощью систем числового программного управления (ЧПУ) известными методами, аналогично подобным задачам, например механообработки.

Задача управления скоростью перемещения электрода-инструмента при ВЭЭО существенно отличается от аналогичной задачи для случая жёстких электродов, например копировально-прошивочной ЭЭО (КПЭЭО). Действительно, при ВЭЭО вследствие малой жёсткости и малой инерционности ПЭИ изменение межэлектродного расстояния возможно также под действием сил, создаваемых разрядами, и, следовательно, динамика процесса разрушения электродов зависит и от них. Величина и динамика МЭП при ВЭЭО зависит также от параметров и качества системы перемещения и натяжения электрода-инструмента, что, в свою очередь, влияет на динамику разрушения электродов.

Для того чтобы построить эффективную систему управления, необходимо учитывать динамику формообразования детали с учётом всех перечисленных факторов.

Следует отметить, что это явление широко исследовалось различными отечественными и зарубежными авторами, смотри например [4-8]. Однако во всех известных работах, посвященных этой теме, величина прогиба ПЭИ не связывается с величиной МЭП и со скоростью реза, а именно раскрытие этих взаимосвязей является особенно важным для решения задач управления. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики процесса ВЭЭО с учетом указанных явлений.

Развитие представлений о динамике процесса ВЭЭО

Для описания динамики резания при ВЭЭО необходимо сделать ряд упрощающих допущений, позволяющих выделить наиболее существенные для управления стороны процесса. При ВЭЭО ПЭИ растянут в направляющих, на перемещаемой приводом подачи скобе. Сила натяжения и скорость перемотки ПЭИ заданы и постоянны. Для простоты будем считать движение плоскопараллельным. Будем предполагать, что:

- электрод-деталь (ЭД) разрушается равномерно по всей поверхности взаимодействия;
- электрод-инструмент (ЭИ) не разрушается (восстанавливается в результате перемотки);
- скорость разрушения ЭД убывает с увеличением величины МЭП;
- существует максимальная величина МЭП, при которой процесс прекращается;
- существует величина МЭП, при которой скорость эрозии максимальна;
- площадь обработки постоянна;
- электрод-деталь расположен симметрично относительно направляющих скобы;
- на ПЭИ действует равномерно распределённая постоянная сила, создаваемая электрическими разрядами;
- ПЭИ в процессе реза имеет некоторый прогиб, обусловленный силовым действием разрядов;
- величина прогиба зависит от натяжения ПЭИ, расстояния между направляющими и толщины детали и интенсивности процесса.

Представление о постоянно действующей распределённой силе основано на том, что импульсы силы, создаваемые электрическими разрядами малы, и следуют с частотой, на несколько порядков превосходящей собственную частоту ПЭИ. В результате эти импульсы силы интегрируются на ПЭИ, образуя в среднем постоянную, флуктуирующую, распределённую нагрузку. Сказанное иллюстрирует рисунок 1.

Для целей анализа конкретная форма ПЭИ не существенна, и распределённая сила может быть заменена сосредоточенной в центре рисунка 2.

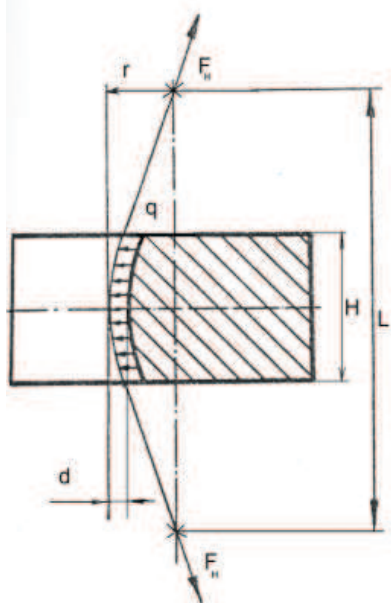


Рисунок 1. Действие распределённой нагрузки

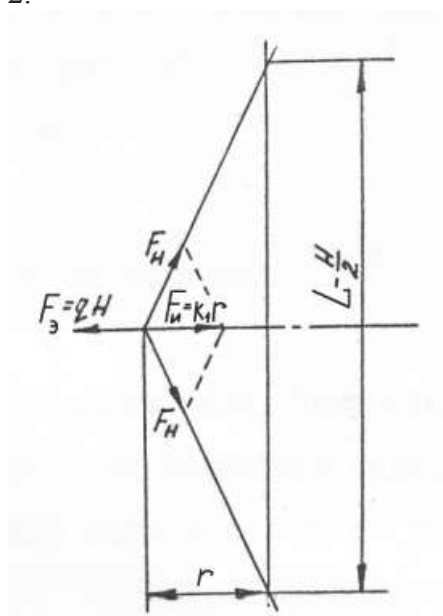


Рисунок 2. Модель ПЭИ с сосредоточенной силой

Силовое действие ПЭИ на процесс может быть охарактеризовано величиной прогиба и жёсткостью ПЭИ определяемой как:

$$k_1 = \frac{4F_n}{\left(L - \frac{H}{2}\right)} \quad (1)$$

где: k_1 – коэффициент жёсткости ПЭИ;

F_n - сила натяжения ПЭИ;

L - расстояние между направляющими;

H - толщина детали.

Для описания динамики процесса ВЭЭО в качестве основной переменной выберем величину МЭП в торце прорезаемого паза. В данном случае для целей моделирования диаметр ПЭИ и ширина прорезаемого паза не существенны, и поэтому положим их равными нулю. Интегральная сила, создаваемая разрядами, зависит от интенсивности процесса, которая, в свою очередь, зависит от величины МЭП. Для построения модели динамики процесса ВЭЭО необходимо оценить эту зависимость, а также установить её взаимосвязь с зависимостью линейной скорости резания с величиной МЭП.

Исследование этих зависимостей проводилось экспериментально на вырезном электроэрозионном станке типа А207.83 с помощью специально разработанного фотоэлектрического измерительного микроскопа (ФЭМ), оптическая схема которого и общий вид приведены на рисунках 3а и 3б соответственно.

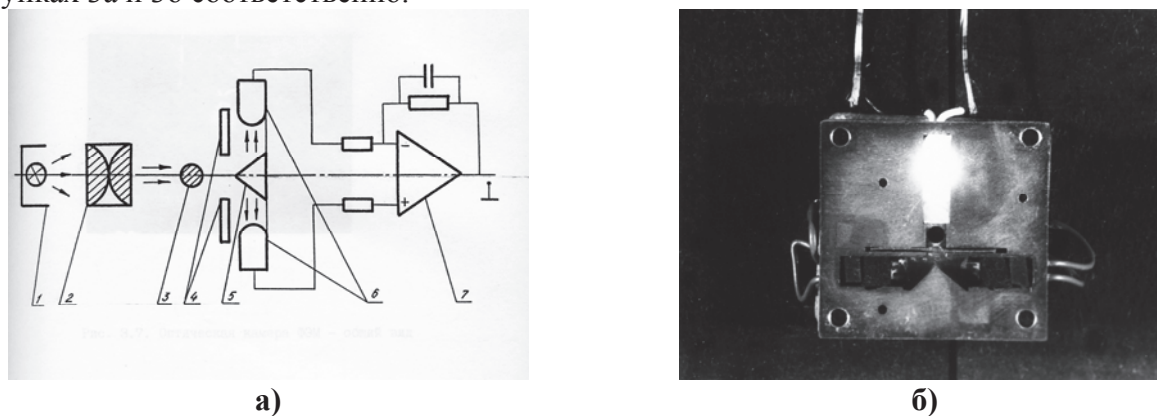


Рисунок 3. Схема и общий вид ФЭМ: 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – ПЭИ, 4 – диафрагма, 5 – делительная призма, 6 – фоторезисторы, 7 – операционный усилитель (ОУ)

Сигналы с фоточувствительных элементов ФЭМ подаются на дифференциальные входы операционного усилителя (ОУ). Принцип работы ФЭМ основан на том, что тень от ПЭИ попадает на делительную призму и на фотоприёмники. Сигнал на выходе ОУ пропорционален отклонению ПЭИ от симметричного положения в зоне измерения. ФЭМ располагался на скобе станка над деталью. Обработка велась с частичным подъёмом ванны так, чтобы деталь была погружена, а ФЭМ оставался на воздухе. Оптическая ось ФЭМ ориентировалась перпендикулярно направлению реза. Предварительно осуществлялась калибровка ФЭМ совместно с усилителем. С выхода ОУ сигнал подавался на один из входов осциллографа. На другой вход осциллографа в различных экспериментах подавались детектированные сигналы, пропорциональные либо амплитуде напряжения на МЭП, либо току разрядов. По этим сигналам можно оценивать величину МЭП. Таким образом, наблюдалось совместно изменение величины МЭП и величины прогиба ПЭИ. В экспериментах рез осуществлялся на постоянной скорости без регулятора подачи.

На рисунке 4 показаны переходные характеристики нарастания прогиба ПЭИ при постоянной скорости подачи. Толщина заготовки в эксперименте 20мм, максимально возможная энергия импульсов - 2,5мДж, частота генератора – 15кГц, возможная средняя мощность в МЭП – 35 Вт, напряжение холостого хода – 100 В, ПЭИ – латунь, диаметр – 0,2мм, натяжение составляло порядка 5Н, раствор скобы - 200мм, жёсткость ПЭИ, рассчитанная по формуле

(1): $k_1 \cong 1 \cdot 10^{-4}$ Н/мкм. Обработка в водопроводной воде.

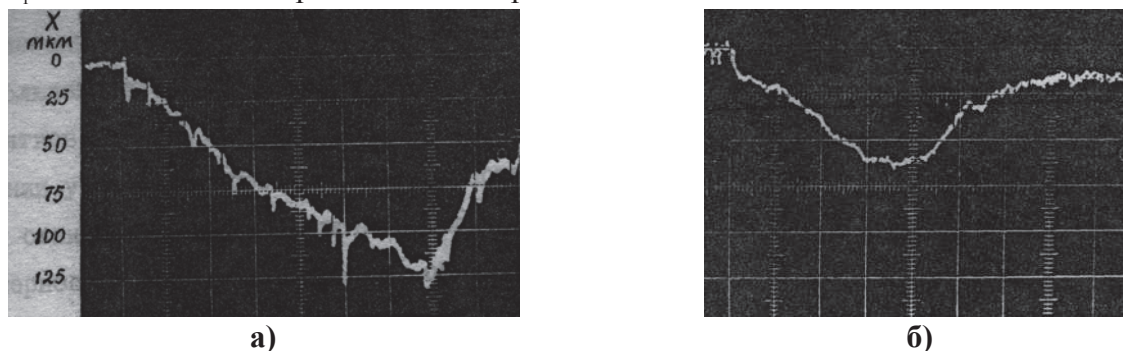


Рисунок 4. Осциллограммы прогиба ПЭИ

На рисунке 4 а показана переходная характеристика при скорости подачи, близкой к предельному значению для выбранного режима, – 12мкм/с. Длительность переходного процесса составляет порядка 200с. После достижения предельного прогиба ПЭИ (нижняя точка на осциллограмме) подача выключалась, и прогиб ПЭИ постепенно уменьшался. Наблюдаемые локальные выбросы на кривой связаны с неравномерностью натяжения ПЭИ, обусловленной перемоткой. Эквивалентная сосредоточенная сила процесса ЭЭО составила около 0,01Н.

На рисунке 4 б показан переходной процесс, полученный при скорости подачи – 6мкм/с. Достижимый прогиб в этом случае примерно в два раза меньше. Как видно из приведённых частных примеров, переходные характеристики по виду близки к экспонентам, а предельная величина прогиба ПЭИ пропорциональна скорости подачи при прочих равных условиях.

На рис.5 показаны переходные характеристики при совместной записи отклонения ПЭИ и сигнала пропорционального амплитуде напряжения на МЭП (нижний луч), полученные в условиях, аналогичных предыдущим.

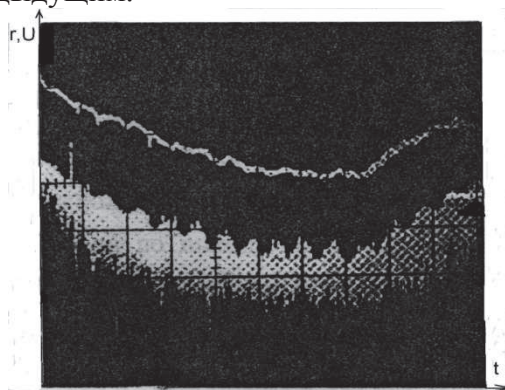


Рисунок 5. Динамика прогиба ПЭИ и напряжения на МЭП

Как известно, амплитуда напряжения на МЭП пропорционально его величине. Из сопоставления осциллограмм следует, что величина прогиба увеличивается с уменьшением МЭП практически по линейному закону. Это говорит о том, что силы, создаваемые процессом, увеличиваются с уменьшением МЭП (градиент сил отрицателен) и положение ПЭИ локально устойчиво.

Приведённые данные носят качественный демонстрационный характер. Однако уже они позволяют выдвинуть следующую гипотезу: процесс ЭЭО создает в МЭП интегральные силы, величина которых пропорциональна уменьшению МЭП, причём эта зависимость подобна зависимости линейной скорости реза от величины МЭП в некотором диапазоне его изменения.

Таким образом, силовое действие электрических разрядов на электрод-инструмент при электроэрозионном резании можно уподобить действию упругого элемента, работающего на сжатие. В линейном приближении может быть оценен коэффициент жёсткости этого упруго-

го элемента. Для оценки необходимо определить диапазон МЭП, при котором процесс ЭЭО протекает устойчиво, и определить также наибольшее значение интегральной силы разрядов при минимальном значении величины МЭП, при котором процесс обработки идёт с наибольшей интенсивностью и достигается максимальная линейная скорость реза.

Максимальное межэлектродное расстояние, при котором начинаются электрические разряды, расстояние электроэрозионного взаимодействия, зависит от электрической прочности жидкой диэлектрической среды и напряжения холостого хода. Оно может быть определено непосредственным измерением. При напряжении холостого хода, в условиях эксперимента, 100В, в водопроводной воде это расстояние составляло 40-45 мкм. Таким образом, электрическая прочность водопроводной воды при шероховатых коаксиальных цилиндрических электродах составила порядка 2,5 В/мкм.

В основу определения минимального межэлектродного расстояния, соответствующего максимумам скорости реза и интегральной силы электрических разрядов, были положены следующие наблюдения. При резании с постоянной скоростью, превосходящей некоторую максимальную скорость, соответствующую максимальной скорости электроэрозионного процесса в условиях эксперимента, после завершения переходного процесса короткое замыкание электродов (КЗ) наступало скачком. Это говорит о том, что существует диапазон малых межэлектродных расстояний, при которых уменьшение величины МЭП влечёт уменьшение сил эрозионного процесса (градиент сил положителен), и положение ПЭИ в этом диапазоне МЭП неустойчиво. Наблюдение процесса наступления КЗ с помощью ФЭМ позволило оценить величину этого диапазона примерно в 5-10 мкм. Соприкосновение электродов (КЗ) происходит скачком, так как при входе ПЭИ в этот диапазон МЭП, в системе перемотки и натяжения ПЭИ уже имеется некоторый запас потенциальной энергии, обусловленный удлинением рабочего участка ПЭИ вследствие его прогиба.

Таким образом, диапазон МЭП, соответствующий устойчивому течению процесса резания, составляет примерно 30-40 мкм. По этим данным могут быть определены градиенты скорости и сил в МЭП по формулам:

$$k_2 = \frac{V_{ЭМ}}{d_m - d_0}; k_3 = \frac{F_{ЭМ}}{d_m - d_0} \quad (2)$$

где: $k_2 \left[\frac{1}{с} \right]$ – градиент скорости реза в линейном приближении;

$k_3 \left[\frac{Н}{мкм} \right]$ – градиент силы, создаваемый электрическими разрядами (эквивалентная жёсткость процесса ЭЭО);

$V_{ЭМ} \left[\frac{мм}{с} \right]$ – максимальная линейная скорость процесса электроэрозии;

$F_{ЭМ} [Н]$ – максимальное значение интегральной силы, создаваемой разрядами;

d_m, d_0 – максимальное и минимальное значения величины МЭП, измеренные в микрометрах соответственно (область устойчивости).

В условиях эксперимента $k_2 = 0,3с^{-1}$, $k_3 = 2,5 \cdot 10^{-4} Н/мкм$.

Для решения задачи управления процессом ВЭЭО особый интерес представляет изучение механизма наступления режима устойчивого КЗ, так как для достижения максимальной скорости реза необходимо вести обработку при минимальном значении величины МЭП на границе устойчивой области. Наблюдения показывают, что в области малых МЭП нарастает число импульсов короткого замыкания, возникающих по разным причинам (колебания ПЭИ, мостики расплава, проводящие частицы и т.д.). При этом сила, поддерживающая прогиб ПЭИ, уменьшается. Если прогиб ПЭИ больше минимальной величины МЭП, ПЭИ прижимается к заготовке, возникает режим контактирования подвижных, шероховатых поверхностей, и возможно возникновение устойчивого, короткого замыкания, устраняемого отводом ПЭИ по пройденной траектории.

Совместное осциллографирование прогиба ПЭИ и импульсов напряжения показало, что импульсы КЗ возникают ещё в области устойчивого течения процесса, но при приближении к границе устойчивости импульсы КЗ образуют группы по несколько импульсов подряд, при-

чём число импульсов в группах увеличивается. На рис. 6 приведены осциллограммы прогиба и импульсов напряжения (нижняя кривая) с помеченными положениями ПЭИ, в которых измерены амплитуды напряжения в развёрнутом масштабе. На рис. 7 приведены эти осциллограммы: а) – в точке 1, б) – в точке 2.

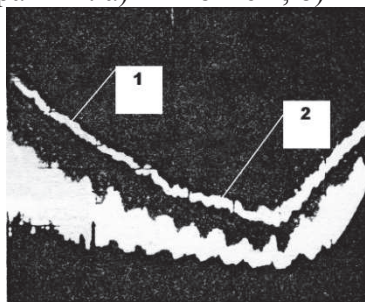
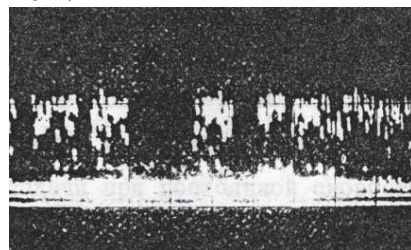
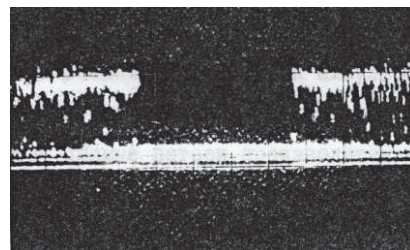


Рисунок 6. Прогиб ПЭИ



а)



б)

Рисунок 7. Осциллограммы группировки импульсов КЗ

Это явление, возможно, связано с малыми колебаниями ПЭИ и требует дополнительного изучения. В системах управления оно может быть использовано как предвестник близости процесса к границе устойчивости.

Выводы

1. Исследования распределения интегральной силы, создаваемой электрическими разрядами в процессе ВЭО, показали, что эти силы возрастают с уменьшением величины МЭП практически по линейному закону и могут быть уподоблены действию упругого элемента с фиксированным коэффициентом жёсткости.
2. Зависимость интегральной силы от величины МЭП подобна аналогичной зависимости линейной скорости реза, и они могут быть охарактеризованы соответствующими коэффициентами.
3. В процессе обработки ПЭИ находится в состоянии устойчивого равновесия под действием двух противоположно направленных сил, интегральной силы, создаваемой электрическими разрядами, и силы, создаваемой системой натяжения, линейно зависящей от величины прогиба ПЭИ.
4. При малых значениях величины МЭП устойчивость процесса обработки нарушается из-за лавинообразного нарастания числа импульсов короткого замыкания и наличия запаса потенциальной энергии в системе перемотки и натяжения ПЭИ, связанного с прогибом ПЭИ, при этом устойчивое состояние КЗ наступает скачком.
5. При уменьшении величины МЭП и приближении к границе устойчивости наблюдается эффект группирования импульсов КЗ, который может быть использован как предвестник потери устойчивости.
6. Полученные данные и развитые на их основе представления о динамике процесса ВЭО требуют математического обобщения и в этом случае могут быть использованы для совершенствования систем управления перемещением ПЭИ.

Литература

1. Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б. Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки. «Металлообработка», 2010, № 2, с. 42-46.
2. Саушкин Б.П., Шандров Б.В., Моргунов Ю.А. Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2012, № 2, с. 242-248.
3. Астахов Ю.П., Кочергин А., Моргунов Ю.А., Митрюшин Е.А., Саушкин Г.Б. Микрообработка поверхностных рельефов с применением физико-химических методов воздействия на материал Научные технологии в машиностроении, 2012, № 7. с. 33-38.
4. Бихман Б.М., Коренблюм М.В., Рейбах С.Ю. Исследование влияния колебаний электрода-провода на качество обработки при электроэрозионном вырезании. // Электронная обработка материалов. 1985, № 6. с. 8-12.
5. Алексеев Г.А., Волков Ю.С., Сосенко А.Б. Расчёт отжимающей силы, действующий на

- электрод-инструмент при электроэрозионной обработке. // Электрофизикохимическая обработка. Технология, оборудование, станочные системы. Сборник научных трудов под редакцией Б.Х. Мечетнера. ЭНИМС ОНТИ, М. 1987. с. 106-109.
6. Рейбах С.Ю. Повышение точности электроэрозионного вырезания за счёт совершенствования механизма перемотки электрода-провода. // А.р. диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. М. ЭНИМС, 1988. 16 с.
 7. Naotake Mohri, Masayuki Suzuki, Nagao Saito Time dependence of electrode wear in EDM. // Proceedings ISEM-XI, Lausanne, Switzerland 1995. P. 447-454.
 8. Ivano Beltrami, Axel Bertholds, Dirk Dauw Wire-EDM precision improvement by on-line wire position control. // Proceedings ISEM-XI, Lausanne, Switzerland 1995. P. 437-445.

Определение напряженно-деформированного состояния пластически деформируемого тела применительно к процессам полугорячего прямого выдавливания и редуцирования в конические матрицы

к.т.н. доц. Пыжов В.В., к.т.н. доц. Шлыкова А.В.

Университет машиностроения

(495) 223-05-23, доб. 1387, pyjov.56@mail.ru, av64745@comtv.ru

Аннотация. В статье рассматривается необходимость создания надежной методики определения силовых параметров процесса полугорячей объемной штамповки. Сформулирована постановка краевой задачи определения напряженно-деформированного состояния вязкопластически деформируемого тела применительно к процессам полугорячего выдавливания в конические матрицы и определены гипотезы, принятые при её постановке.

Ключевые слова: полугорячая объемная штамповка, методика, определение напряженно-деформированного состояния

Введение

Одним из наиболее прогрессивных методов получения штампованных заготовок является объемная штамповка выдавливанием – холодная, полугорячая, горячая.

Горячая штамповка позволяет получать штампованные заготовки большой массы, но характеризуется значительным окислением их поверхности. Холодная объемная штамповка характеризуется высоким качеством поверхности и точностью размеров, но не позволяет деформировать изделия из высокоуглеродистых, высоколегированных и труднодеформируемых сталей большой массы и с большими степенями обжатия. Полугорячая объемная штамповка позволяет получать из этих материалов заготовки по размерной точности и чистоте поверхности, близкие к холодной объемной штамповке. Предварительный подогрев (500 -750⁰С) перед штамповкой снижает сопротивление деформации в 3...4 раза по сравнению с холодной объемной штамповкой, повышает пластичность ввиду появления разупрочняющих процессов и снижает удельные нагрузки на инструмент. Вместе с тем широкое внедрение процессов полугорячей объемной штамповки в производство сдерживается многими факторами и в первую очередь отсутствием надежной методики определения силовых параметров процесса, особенно при многопереходной штамповке. Это обусловлено наличием зависимости сопротивления металла деформации как от степени, так и скорости деформации, необходимостью учета истории нагружения, тепловых эффектов и процессов теплообмена.

Для решения этих задач предлагается разработать экспериментально-аналитическую методику расчета показателей напряженного и деформированного состояния, базирующуюся на положениях теории ползучести и использующую механико-математическую модель вязкопластического тела.

Данная работа посвящена постановке краевой задачи определения напряженно-деформированного состояния пластически деформируемого тела применительно к процессам полугорячего прямого выдавливания и редуцирования в конические матрицы.