

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

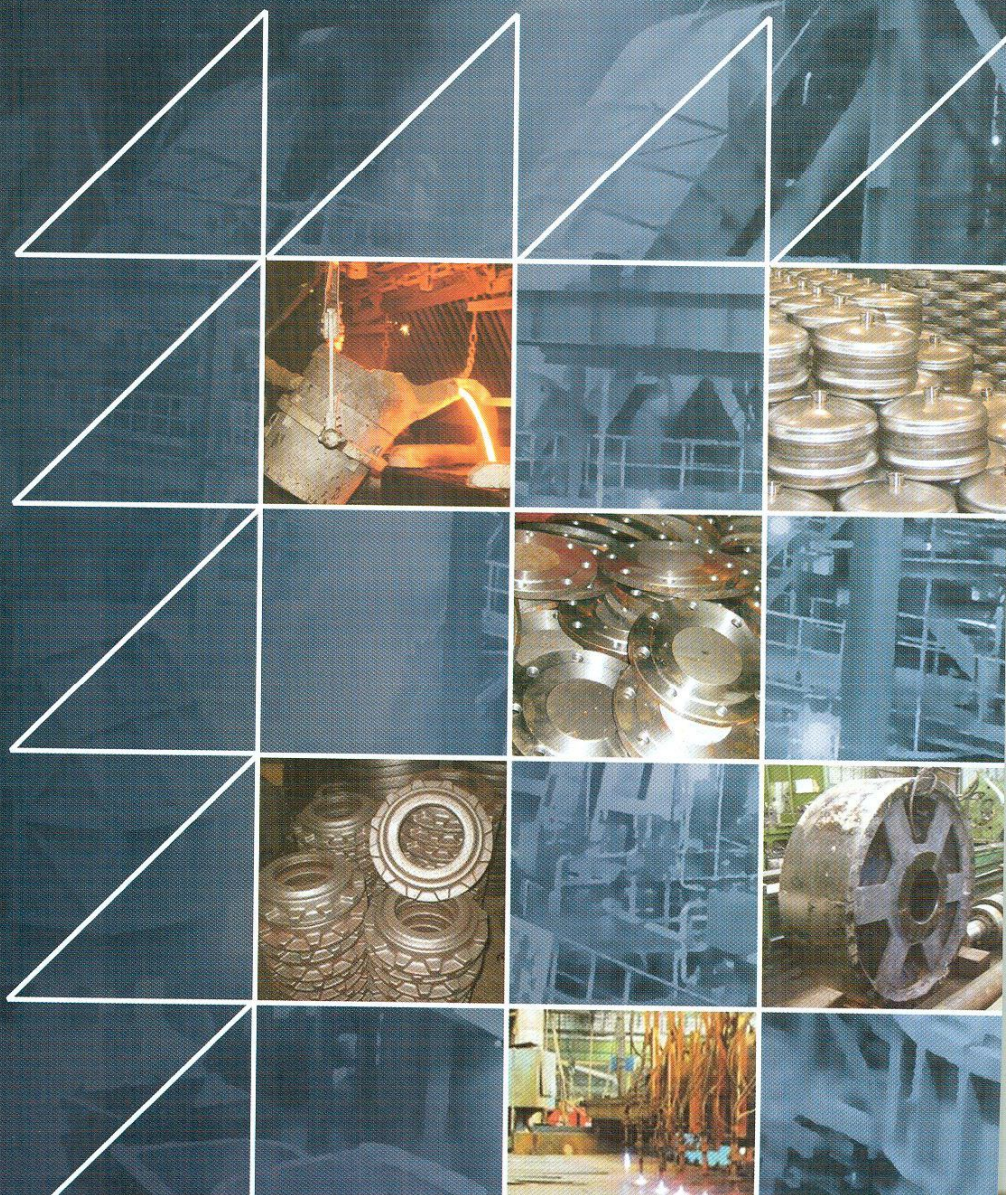
КУЗНЕЧНО-ШАМПОВОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ И ДРУГИЕ ПРОИЗВОДСТВА

ISSN 1684-1107

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

6

2012



Председатель
редакционного совета и
Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя
редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного
редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:

БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЕРШОВ М.Ю.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КИДАЛОВ Н.А.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ШЕСТАКОВ Н.А.
ШПУНЬКИН Н.Ф.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственный
за подготовку и выпуск
номера
ЛУТОВИНИНА О.Н.

За содержание рекламных
материалов ответственность
несет рекламодатель

Журнал распространяется по
подписке, которую можно
оформить в любом почтовом
отделении (индекс по каталогу
агентства "Роспечать" 81580,
по Объединённому каталогу
"Пресса России" 39205,
по каталогу "Почта России"
60261) или непосредственно
в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru,
zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Васильев В.Н., Попкович Т.Г. Особенности инновационного развития
предприятий заготовительных производств в машиностроении 3

Литейное и сварочное производства

Королёв А.В., Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Агатаев Ю.Ю., Гусева О.Б.,
Комиссаров А.Н. Комплексные системы заливки сверху через фильтры
как способ управления качеством отливки 7
Дриц А.М., Овчинников В.В., Пахомов Д.А., Гуреева М.А. Влияние технологии
сварки на свойства соединений листов сплава системы Al-Zn-Mg 10

Кузнечно-штамповочное производство

Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А., Шайхулов М.В.
Исследование контактного трения при горячей пластической деформации
сплава АВ 18
Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Батулин А.А. Управление
остановкой подвижной траверсы прессы в заданном положении 22
Хван А.Д., Хван Д.В. Пластическая осадка длинномерных цилиндрических
заготовок 27
Поляков А.П. О модели пористого материала, учитывающей полидисперсность
порошка 29

Прокатно-волочильное производство

Гурьянов Г.Н. Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске
с учетом напряженного состояния круглой заготовки на выходе рабочего
конуса волоки 34

Материаловедение и новые материалы

Ковтунов А.И., Семистенов Д.А., Хохлов Ю.Ю., Новский И.В. Исследование
физико-механических свойств пеноалюминия, полученного фильтрацией
через водорастворимые соли 37
Титова Ю.В., Шиганова Л.А., Майдан Д.А., Бичуров Г.В. Самораспростра-
няющийся высокотемпературный синтез микро- и нанокompозиции нитридов
титана и алюминия с использованием азидов натрия и галогидных солей
азотируемых элементов 42

Информация

Шубин И.Г., Румянцев М.И., Степанова Е.Н. Оценка результативности
и стабильности производства грузоподъемных канатов 46

**Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ
изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней**

Журнал выходит при содействии:

Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования
и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов;
ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода
"Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых
в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со
ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

**Chairman of Editorial
Committee and
Editor-in-chief**
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants:
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

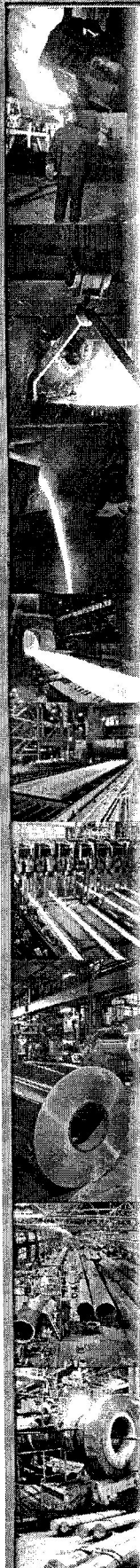
Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

**This issue prepared with
assistance of specialist**
LUTOVININA O.N.

An advertiser is responsible
for the promotional materials

Journal is spreaded on
a subscription, which can be
issued in any post office (index
on the catalogue of the
"Rospechat" agency 81580,
on the united catalogue "Pressa
Rossii" 39205, catalogue
"Pochta Rossii" 60261)
or immediately in the edition
of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru,
zpmpost@rambler.ru



CONTENTS

Vasil'ev V.N., Popkovich T.G. Innovation development specifics of blanking productions in mechanical engineering 3

Casting and Welding Productions

Korolev A.V., Chernyshov E.A., Evlampiev A.A., Agateev Yu.Yu., Guseva O.B., Komissarov A.N. Complex systems of pouring from above through filters as way to control of casting quality 7
Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Pakhomov D.A., Gureeva M.A. Influence of welding technology on properties of Al-Zn-Mg alloy sheets joints 10

Forging and Stamping Productions

Potapenko K.E., Pen'kov I.V., Voronkov V.I., Petrov P.A., Shaykhulov M.V. Study of interfacial friction during hot plastic deformation of alloy AV 18
Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M., Baturin A.A. Controlling of press walking beam braking in specified position 22
Khvan A.D., Khvan D.V. Plastic upsetting of long-length cylindrical preparations 27
Polyakov A.P. Model of porous material that takes into account polydispersion of powder 29

Rolling and Drawing Productions

Gur'yanov G.N. Calculation of axial stress gain in calibrating parallel taking into account stressed state of round preparation on output working cone of die 34

Physical Metallurgy and New Materials

Kovtunov A.I., Semistenov D.A., Khokhlov Yu.Yu., Novsky I.V. Study of physical and mechanical properties of foam aluminum formed by filtration through water-soluble salts 37
Titova Yu.V., Shiganova L.A., Maydan D.A., Bichurov G.V. Self-propagating high-temperature synthesis of titanium nitride and aluminum nitride micro- and nanocomposition with sodium azide and haloid salts of nitrogenize elements 42

Information

Shubin I.G., Rumyantsev M.I., Stepanova E.N. To creation of effectiveness and stability estimation model of hoisting ropes production 46

**Journal is included into the list of the Higher Examination Board
for publishing of competitors for the academic degrees theses**

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Blanking productions in mechanical engineering"

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, А.А. Батурин
(ООО "Уральский инжиниринговый центр", г. Челябинск)

Управление остановкой подвижной траверсы пресса в заданном положении

Рассмотрены различные варианты снижения скорости движения траверсы пресса при ее подходе к заданному положению с точки зрения минимизации времени выполнения технологической операции (рабочего или возвратного хода) для случаев отсутствия и наличия ограничения на абсолютную величину ускорения торможения траверсы.

Ключевые слова: гидравлический пресс; управление подвижной траверсой; закон торможения; путь торможения; время технологической операции.

Different methods of press walking beam velocity reduction when approaching the specified position in terms of operation (forward or back travel) time minimization in case if absolute value of beam braking acceleration is limited or not are considered.

Keywords: hydraulic press; walking beam control; braking law; braking path; operation time.

При эксплуатации гидравлических прессов в полуавтоматическом и автоматическом режимах управления обычно задают координаты положения подвижной траверсы, при достижении которых (с некоторой погрешностью, находящейся в установленных пределах) траверса должна останавливаться по окончании рабочего и возвратного ходов.

Особенно важным является обеспечение своевременной остановки подвижной траверсы пресса по окончании рабочего хода, когда он завершается без соприкосновения бойков или штампов, так как от этого зависят годность и точность формируемого на прессе изделия, трудоемкость его последующей механической обработки и возникающие при этом потери металла в стружку. С учетом последнего положения далее рассмотрен процесс остановки подвижной траверсы пресса в заданном положении по окончании рабочего хода, совершаемого без соприкосновения бойков или штампов, хотя все приведенные ниже рассуждения применимы и к случаю осуществления остановки траверсы по окончании возвратного хода.

Для достижения наивысшей производительности пресса при прочих равных условиях необходимо, чтобы на протяжении всего рабочего хода подвижной траверсы ее движение происходило с некоторой высокой заданной скоростью $v_{\text{зад}}$, а при достижении заданного положения с координатой $z_{\text{зад}}$ скорость движения v траверсы скачкообразно уменьшалась до нуля. Очевидно, что мгновенное снижение скорости движения траверсы на конечную величину (как и любого другого материального объекта) практически невозможно.

В рассматриваемом случае после подачи управляющего сигнала на прекращение рабочего хода траверсы происходит ее дополнительное перемещение на некоторую величину Δz , во-первых, потому, что отра-

ботка сигнала на закрытие проходного сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров пресса требует определенного промежутка времени, а во-вторых, из-за инерционности подвижной траверсы и движущихся с ней частей, высокого давления рабочей жидкости в полостях рабочих гидроцилиндров после закрытия проходного сечения их напорных клапанов, напряженного состояния металлоконструкций пресса в конце рабочего хода и податливости металла заготовки.

Для снижения величины Δz при прочих равных условиях сразу после закрытия проходного сечения напорных клапанов рабочих гидроцилиндров должны обеспечиваться снижение давления в полостях рабочих гидроцилиндров путем открытия проходного сечения их сливных клапанов и подача команды на осуществление возвратного хода подвижной траверсы пресса.

Если бы величина Δz дополнительного перемещения подвижной траверсы от одного ее рабочего хода к другому была стабильной и известной, то обеспечение остановки траверсы в заданном положении не составляло бы труда. Для этого достаточно подавать сигнал на прекращение рабочего хода в тот момент времени, когда в процессе рабочего хода текущая координата траверсы принимает значение: $z_{\text{зад}} - \Delta z$ (здесь и далее будем считать, что во время выполнения рабочего хода скорость v движения подвижной траверсы является положительной и, соответственно, координата z траверсы увеличивается).

Однако фактически величина Δz от хода к ходу траверсы по целому ряду причин (в первую очередь из-за изменения параметров подвергающейся деформации заготовки) меняется. При этом возможны ситуации, когда координата z подвижной траверсы в момент начала рабочего хода имеет значение $z_{\text{н.р.х}}$, большее величины $z_{\text{зад}} - \Delta z$ ($z_{\text{зад}} - \Delta z < z_{\text{н.р.х}} < z_{\text{зад}}$). Снижение ско-

рости движения траверсы от большого значения $v_{\text{зад}}$ до нуля за короткий отрезок времени сопровождается возникновением гидравлических ударов в гидросистеме пресса, что отрицательно сказывается на надежности ее работы [1]. Для исключения при торможении траверсы гидравлических ударов ускорение ее торможения a не должно быть меньше некоторого предельного значения $a_{\text{пр}}$ ($a_{\text{пр}} < 0$).

При модернизации гидросистемы и системы управления гидравлического ковочного пресса ПА 1343 силой 20 МН (изготовитель: Днепропетровский завод прессов, Украина) в кузнечно-прессовом цехе ОАО "Буммаш" (г. Ижевск) был предложен и реализован следующий алгоритм управления остановкой подвижной траверсы в заданном положении по окончании рабочего хода [2].

При достижении подвижной траверсой пресса в процессе рабочего хода положения с координатой $z_{\text{зад}} - \Delta z_{\text{ск}}$ (где $\Delta z_{\text{ск}}$ — поправка по координате, принятая для начала снижения скорости движения подвижной траверсы) формируется сигнал на уменьшение скорости движения v подвижной траверсы со значения $v_{\text{зад}}$ до некоторого малого значения $v_{\text{м}}$.

При дальнейшем достижении траверсой положения с координатой $z_{\text{зад}} - \Delta z_{\text{ост}}$ формируется сигнал на остановку траверсы (где $\Delta z_{\text{ост}}$ — поправка по координате, принятая для формирования сигнала на остановку подвижной траверсы ($\Delta z_{\text{ост}} < \Delta z_{\text{ск}}$). Если $z_{\text{зад}} - \Delta z_{\text{ск}} < z_{\text{н.р.х}} < z_{\text{зад}} - \Delta z_{\text{ост}}$, то рабочий ход с самого его начала осуществляется при задании скорости движения траверсы, равной $v_{\text{м}}$.

По окончании рабочего хода траверсы ее фактическая координата останова $z_{\text{ост}}$ фиксируется и для следующего рабочего хода автоматически корректируется значение поправки $\Delta z_{\text{ост}}$ с учетом достигнутой погрешности $z_{\text{ост}} - z_{\text{зад}}$ в остановке траверсы в заданном положении [3].

Рассмотренный алгоритм является достаточно простым, может быть реализован даже при использовании недорогой направляющей гидроаппаратуры для управления клапанами гидрораспределителя рабочих гидроцилиндров [4], однако не всегда обеспечивает остановку подвижной траверсы пресса в заданном положении $z_{\text{зад}}$ с допустимой погрешностью $\pm \delta_{\text{погр}}$.

Для остановки траверсы в заданном положении с высокой точностью необходимо, чтобы при приближении координаты z траверсы к значению $z_{\text{зад}}$ скорость движения траверсы плавно снижалась до нуля по тому или иному закону. Однако для минимизации продолжительности рабочего хода желательно чтобы в момент времени, когда координата z траверсы принимает значение $z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}$ (т.е. текущая координата траверсы оказывается в зоне допустимой погрешности на остановку последней), скорость движения траверсы равнялась $v_{\text{мин}}$ ($v_{\text{мин}} < v_{\text{зад}}$) и при этом формировался сигнал на полную остановку траверсы. При промежутке времени $t_{\text{ост}}$, необходимом для остановки тра-

версы, величина $v_{\text{мин}}$ в первом приближении составляет

$$v_{\text{мин}} = \delta_{\text{погр}} / t_{\text{ост}}. \quad (1)$$

На этапе торможения траверсы пресса при ее подходе к заданному положению $z_{\text{зад}}$ наиболее простым с точки зрения реализации представляется снижение скорости v движения траверсы по линейному закону в функции текущей координаты z последней (все параметры для указанного случая далее обозначены нижним индексом "1").

При этом в соответствии с приведенным выше на этапе торможения траверсы должно выполняться соотношение

$$v_1 = v_{\text{мин}} + k_1(z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - z_1), \quad (2)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности.

Поскольку в момент начала торможения траверсы скорость v_1 ее движения равна $v_{\text{зад}}$, то на основании последнего выражения получаем следующую формулу для определения координаты $z_{\text{н.т1}}$ начала торможения траверсы:

$$z_{\text{н.т1}} = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - (v_{\text{зад}} - v_{\text{мин}}) / k_1. \quad (3)$$

Если координата z подвижной траверсы в момент начала рабочего хода имеет значение $z_{\text{н.р.х}}$, большее величины $z_{\text{н.т1}}$ и меньшее величины $z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}$ ($z_{\text{н.т1}} < z_{\text{н.р.х}} < z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}$), то скорость v ее движения на протяжении всего рабочего хода должна изменяться в соответствии с выражением (2).

С учетом того, что $v = dz/dt$, где t — время, выражение (2) преобразуется в дифференциальное неоднородное уравнение первого порядка относительно координаты z_1 траверсы на этапе торможения последней

$$dz_1/dt + k_1 z_1 = v_{\text{мин}} + k_1(z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}). \quad (4)$$

Решение уравнения (4) в предположении, что $z_1 = z_{\text{н.т1}}$ при $t = 0$, имеет вид:

$$z_1 = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - (v_{\text{зад}} e^{-k_1 t} - v_{\text{мин}}) / k_1, \quad (5)$$

где e — основание натуральных логарифмов ($e = 2,71828...$).

Соответственно закон изменения скорости v_1 движения траверсы в функции времени t на этапе ее торможения в рассматриваемом случае является следующим:

$$v_1 = v_{\text{зад}} e^{-k_1 t}. \quad (6)$$

Обозначим промежуток времени, за который траверса в процессе ее торможения перемещается от положения с координатой $z_{\text{н.т}}$ до положения с координатой $z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}$ через $\Delta t_{\text{т}}$ (время торможения), а пройденный ею за это время путь (путь торможения) через $\Delta z_{\text{т}}$ ($\Delta z_{\text{т}} = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - z_{\text{н.т}}$).

Поскольку при $t = \Delta t_{\text{т}}$ координата траверсы $z = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}}$, то на основании выражения (5) имеем

$$v_{\text{зад}} / v_{\text{мин}} = e^{k_1 \Delta t_{\text{т}}}, \quad (7)$$

откуда

$$k_1 = \frac{1}{\Delta t_{T1}} \ln(v_{\text{зад}} / v_{\text{min}}). \quad (8)$$

При фиксированных значениях $v_{\text{зад}}$, v_{min} и Δt_{T1} последнее выражение позволяет рассчитать требуемое значение коэффициента пропорциональности k_1 .

Используя выражение (8), на основании зависимостей (6) и (3) получаем

$$v_1 = v_{\text{зад}} (v_{\text{min}} / v_{\text{зад}})^{t/\Delta t_{T1}}; \quad (9)$$

$$\Delta z_{T1} = \frac{1 - v_{\text{min}} / v_{\text{зад}}}{\ln(v_{\text{зад}} / v_{\text{min}})} v_{\text{зад}} \Delta t_{T1}, \quad (10)$$

или при переходе к безразмерным параметрам

$$\bar{v}_1 = \bar{v}_{\text{min}}^{\bar{t}_1}; \quad (11)$$

$$\overline{\Delta z_{T1}} = \frac{\bar{v}_{\text{min}} - 1}{\ln \bar{v}_{\text{min}}}, \quad (12)$$

где $\bar{v} = v / v_{\text{зад}}$; $\bar{t} = t / \Delta t_T$; $\overline{\Delta z_T} = \Delta z_T / (v_{\text{зад}} t_T)$.

При прочих равных условиях (при равных значениях $v_{\text{зад}}$, v_{min} и Δt_T) в предположении, что $z_{\text{н.р.х}} < z_{\text{н.т}}$, чем больше путь торможения Δz_T , тем меньше часть рабочего хода, которую траверса совершает с высокой скоростью $v_{\text{зад}}$, и тем меньше время выполнения рабочего хода в целом. В связи с этим наиболее предпочтительным является алгоритм управления остановкой подвижной траверсы в заданном положении, характеризующийся при прочих равных условиях наибольшим значением пути торможения Δz_T .

Для сравнения рассмотрим случай, когда в процессе торможения траверсы перед ее остановкой уменьшение скорости v движения траверсы происходит по линейному закону в функции времени t , отсчитываемого с момента начала торможения (все параметры для указанного случая далее обозначены нижним индексом "2"):

$$v_2 = v_{\text{зад}} - (v_{\text{зад}} - v_{\text{min}})t / \Delta t_{T2}, \quad (13)$$

или при использовании безразмерной формы записи

$$\bar{v}_2 = 1 - (1 - \bar{v}_{\text{min}})\bar{t}_2. \quad (14)$$

При этом путь Δz_{T2} , пройденный траверсой за время ее торможения, составляет

$$\Delta z_{T2} = \int_0^{\Delta t_{T2}} v_2 dt = 0,5(1 + v_{\text{min}} / v_{\text{зад}}) v_{\text{зад}} \Delta t_{T2}, \quad (15)$$

или в безразмерном виде

$$\overline{\Delta z_{T2}} = 0,5(1 + \bar{v}_{\text{min}}), \quad (16)$$

а координата $z_{\text{н.т}2}$ начала торможения траверсы определяется выражением

$$z_{\text{н.т}2} = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - 0,5(1 + v_{\text{min}} / v_{\text{зад}}) v_{\text{зад}} \Delta t_{T2}. \quad (17)$$

На основании формул (12) и (16) видно, что при одних и тех же значениях $v_{\text{зад}}$, v_{min} и $\Delta t_{T1} = \Delta t_{T2}$ в пределах реально возможного диапазона изменения безразмерного параметра $\bar{v}_{\text{min}} = v_{\text{min}} / v_{\text{зад}}$ ($0 < \bar{v}_{\text{min}} < 1$) при любом значении $\bar{v}_{\text{min}}$ выполняется соотношение: $\Delta z_{T2} > \Delta z_{T1}$ (рис. 1) и, соответственно, с учетом приведенного выше снижения скорости движения траверсы пресса в процессе ее торможения по закону (13) является более предпочтительным, чем по закону (2).

Указанное соотношение величин Δz_{T2} и Δz_{T1} связано с тем, что при любых фиксированных значениях $\bar{v}_{\text{min}}$ и $\bar{t}_1 = \bar{t}_2$ из интервала (0, 1): $\bar{v}_2 > \bar{v}_1$ (при $\bar{t} = 0$: $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 = 1$; при $\bar{t} = 1$: $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 = \bar{v}_{\text{min}}$) (рис. 2). В силу этого при снижении скорости v движения траверсы пресса по закону (13) средняя скорость движения траверсы в процессе ее торможения оказывается больше и за одно и то же время $\Delta t_{T1} = \Delta t_{T2} = \Delta t_T$ траверса проходит больший путь по сравнению со случаем снижения скорости по закону (2).

При прочих равных условиях (при равных значениях $v_{\text{зад}}$, v_{min} и Δt_T) средняя скорость движения траверсы на этапе ее торможения будет еще больше, если уменьшение скорости v движения траверсы перед ее остановкой осуществляется в функции времени t (отсчитываемого с момента начала торможения) по степенному закону, например, вида (все параметры для указанного случая далее обозначены нижним индексом "3"):

$$v_3 = v_{\text{зад}} (2 - e^{k_3 t}), \quad (18)$$

где k_3 — коэффициент пропорциональности.

Исходя из того, что при $t = \Delta t_{T3}$ скорость v_3 движения траверсы должна быть равна v_{min} , на основании зависимости (18) находим

$$k_3 = \frac{1}{\Delta t_{T3}} \ln(2 - v_{\text{min}} / v_{\text{зад}}). \quad (19)$$

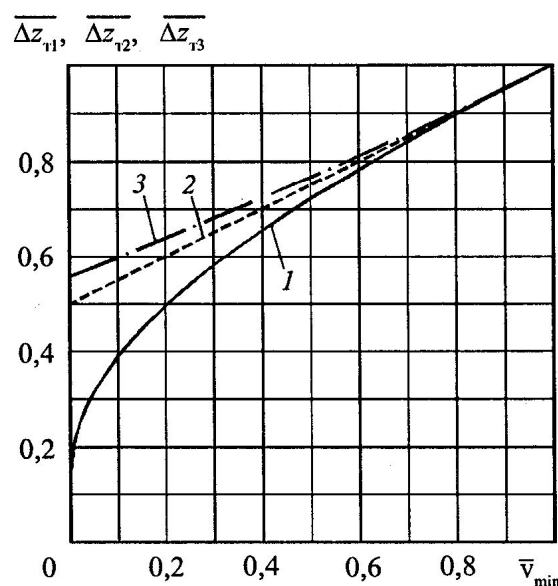


Рис. 1. Зависимости $\overline{\Delta z_{T1}}$ (1), $\overline{\Delta z_{T2}}$ (2) и $\overline{\Delta z_{T3}}$ (3) от $\bar{v}_{\text{min}}$

С учетом выражения (19) зависимость (18) принимает вид

$$v_3 = v_{\text{зад}} [2 - (2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}})^{t/\Delta t_{T3}}] \quad (20)$$

или в безразмерном виде

$$\bar{v}_3 = 2 - (2 - \bar{v}_{\text{мин}})^{\bar{t}_3}. \quad (21)$$

Путь торможения траверсы для рассматриваемого случая составляет

$$\Delta z_{T3} = \int_0^{\Delta t_{T3}} v_3 dt = \left[2 - \frac{1 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}}{\ln(2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}})} \right] v_{\text{зад}} \Delta t_{T3} \quad (22)$$

или при использовании безразмерной формы записи

$$\overline{\Delta z_{T3}} = 2 - \frac{1 - \bar{v}_{\text{мин}}}{\ln(2 - \bar{v}_{\text{мин}})}, \quad (23)$$

а координата $z_{н.Т3}$ начала торможения траверсы определяется выражением

$$z_{н.Т3} = z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - \left[2 - \frac{1 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}}{\ln(2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}})} \right] v_{\text{зад}} \Delta t_{T3}. \quad (24)$$

Согласно результатам расчетов, выполненных с использованием формул (16) и (23), при прочих равных условиях: $\Delta z_{T3} > \Delta z_{T2}$ (за исключением не представляющего практический интерес случая $\bar{v}_{\text{мин}} = 1$, когда $\Delta z_{T3} = \Delta z_{T2} = 1$) и расхождение указанных величин возрастает с уменьшением $\bar{v}_{\text{мин}}$, достигая максимального значения при $\bar{v}_{\text{мин}} = 0$ (при этом $\Delta z_{T3}/\Delta z_{T2} = 1,1146$) (см. рис. 1).

Однако если при снижении скорости движения траверсы прессы по закону (13) ускорение $a_2 = dv_2/dt$ траверсы является постоянным и составляет

$$a_2 = (v_{\text{мин}} - v_{\text{зад}})/\Delta t_{T2}, \quad (25)$$

то при снижении скорости движения траверсы по закону (18) ускорение $a_3 = dv_3/dt$ траверсы является переменным

$$a_3 = -\frac{v_{\text{зад}}}{\Delta t_{T3}} (2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}})^{t/\Delta t_{T3}} \ln(2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}), \quad (26)$$

увеличивается по абсолютной величине с течением времени (за исключением случая $\bar{v}_{\text{мин}} = 1$) и достигает своего максимального по модулю значения $a_{3\text{max}}$ при $t = \Delta t_{T3}$:

$$a_{3\text{max}} = -\frac{v_{\text{зад}}}{\Delta t_{T3}} (2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}) \ln(2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}). \quad (27)$$

При $\Delta t_{T2} = \Delta t_{T3} = \Delta t_T$ отношение

$$\frac{a_{3\text{max}}}{a_2} = \frac{(2 - \bar{v}_{\text{мин}}) \ln(2 - \bar{v}_{\text{мин}})}{(1 - \bar{v}_{\text{мин}})} \quad (28)$$

возрастает с уменьшением $\bar{v}_{\text{мин}}$ и имеет максимальное значение при $\bar{v}_{\text{мин}} = 0$ (при этом $a_{3\text{max}}/a_2 = 1,3863$) (рис. 3).

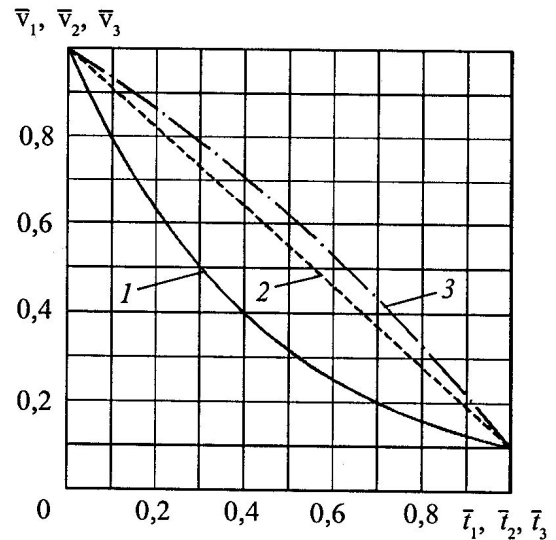


Рис. 2. Зависимости $\bar{v}_1(\bar{t}_1)$ (1), $\bar{v}_2(\bar{t}_2)$ (2) и $\bar{v}_3(\bar{t}_3)$ (3) при $\bar{v}_{\text{мин}} = 0,1$

При снижении скорости движения траверсы по закону (2) ускорение $a_1 = dv_1/dt$ траверсы также является переменным

$$a_1 = \frac{v_{\text{зад}}}{\Delta t_{T1}} (v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}})^{t/\Delta t_{T1}} \ln(v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}), \quad (29)$$

но уменьшается по абсолютной величине с течением времени (за исключением случая $\bar{v}_{\text{мин}} = 1$) и имеет максимальное по модулю значение $a_{1\text{max}}$ при $t = 0$:

$$a_{1\text{max}} = \frac{v_{\text{зад}}}{\Delta t_{T1}} \ln(v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}). \quad (30)$$

Принимая $a_{1\text{max}} = a_2 = a_{3\text{max}} = a_{\text{пр}}$ ($a_{\text{пр}} < 0$), найдем предельные (минимально допустимые из условия исключения гидравлических ударов в процессе торможения траверсы) значения времени торможения:

$$\Delta t_{T1\text{пр}} = \frac{v_{\text{зад}}}{a_{\text{пр}}} \ln(v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}); \quad (31)$$

$$\Delta t_{T2\text{пр}} = (v_{\text{мин}} - v_{\text{зад}})/a_{\text{пр}}; \quad (32)$$

$$\Delta t_{T3\text{пр}} = -\frac{v_{\text{зад}}}{a_{\text{пр}}} (2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}) \ln(2 - v_{\text{мин}}/v_{\text{зад}}). \quad (33)$$

Выражение для вычисления отношения $\Delta t_{T3\text{пр}}/\Delta t_{T2\text{пр}}$ полностью совпадает с правой частью соотношения (28) и график зависимости $\Delta t_{T3\text{пр}}/\Delta t_{T2\text{пр}}$ от $\bar{v}_{\text{мин}}$ имеет вид, показанный на рис. 3.

При $\Delta t_{T1} = \Delta t_{T1\text{пр}}$, $\Delta t_{T2} = \Delta t_{T2\text{пр}}$ и $\Delta t_{T3} = \Delta t_{T3\text{пр}}$ сопоставим соответствующие значения $t_{р.х1\text{пр}}$, $t_{р.х2\text{пр}}$ и $t_{р.х3\text{пр}}$ полного времени рабочего хода для рассматриваемых случаев (в предположении, что $z_{н.р.х} < z_{н.Т1}|_{\Delta t_{T1}=\Delta t_{T1\text{пр}}}$). С учетом выражений (10), (31), (17), (32), (24) и (33) находим:

$$t_{р.х1\text{пр}} = (z_{н.Т1}|_{\Delta t_{T1}=\Delta t_{T1\text{пр}}} - z_{н.р.х})/v_{\text{зад}} + \Delta t_{T1\text{пр}} = t_{р.х\text{мин}} - \frac{v_{\text{зад}}}{a_{\text{пр}}} A_1; \quad (34)$$

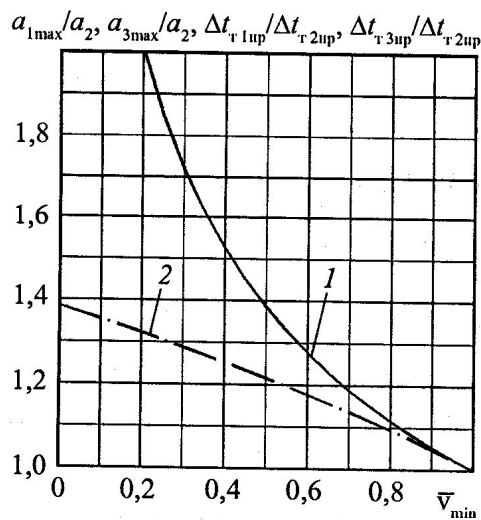


Рис. 3. Зависимости $a_{1\max}/a_2$ (1), $a_{3\max}/a_2$ (2) при $\Delta t_{t1} = \Delta t_{t2} = \Delta t_{t3}$ и $\Delta t_{t1\text{пр}}/\Delta t_{t2\text{пр}}$ (1), $\Delta t_{t3\text{пр}}/\Delta t_{t2\text{пр}}$ (2) при $a_{1\max} = a_2 = a_{3\max} = a_{\text{пр}}$ от $\bar{v}_{\min}$

$$t_{\text{р.х } 2\text{пр}} = (z_{\text{н.т2}} |_{\Delta t_{t2} = \Delta t_{t2\text{пр}}} - z_{\text{н.р.х}}) / v_{\text{зад}} + \Delta t_{t2\text{пр}} = t_{\text{р.х } \min} - \frac{v_{\text{зад}}}{a_{\text{пр}}} A_2; \quad (35)$$

$$t_{\text{р.х } 3\text{пр}} = (z_{\text{н.т3}} |_{\Delta t_{t3} = \Delta t_{t3\text{пр}}} - z_{\text{н.р.х}}) / v_{\text{зад}} + \Delta t_{t3\text{пр}} = t_{\text{р.х } \min} - \frac{v_{\text{зад}}}{a_{\text{пр}}} A_3, \quad (36)$$

где $t_{\text{р.х } \min} = (z_{\text{зад}} - \delta_{\text{погр}} - z_{\text{н.р.х}}) / v_{\text{зад}}$;
 $A_1 = \bar{v}_{\min} - 1 - \ln \bar{v}_{\min}$; $A_2 = (1 - \bar{v}_{\min})^2 / 2$;
 $A_3 = (2 - \bar{v}_{\min}) [1 - \bar{v}_{\min} - \ln(2 - \bar{v}_{\min})]$.

При любом значении $\bar{v}_{\min}$ из интервала (0, 1):
 $t_{\text{р.х } 2\text{пр}} < t_{\text{р.х } 3\text{пр}} < t_{\text{р.х } 1\text{пр}}$ (рис. 4).

Таким образом, с учетом ограничения на абсолютную величину ускорения траверсы в процессе ее торможения

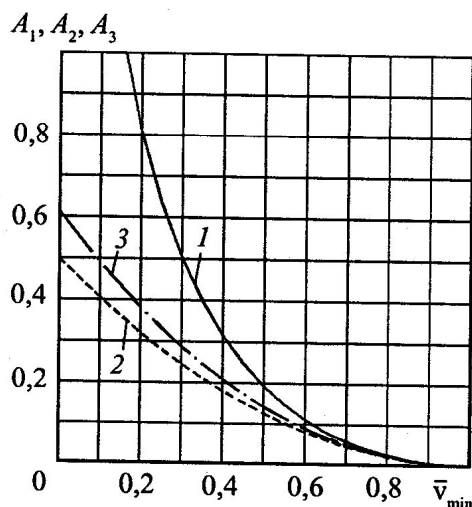


Рис. 4. Зависимости безразмерных коэффициентов A_1 (1), A_2 (2) и A_3 (3) от $\bar{v}_{\min}$

можения при подходе к требуемому положению наиболее рациональным является обеспечение снижения скорости движения траверсы по линейному закону в функции времени.

Результаты выполненного исследования применены при разработке алгоритма управления гидравлическим ковочным прессом с номинальной силой 30 МН, выпущенным на УралМашзаводе (заводской номер № 1-4657.00), модернизация электрогидравлической системы управления которого в 2011 г. проведена ООО "Уральский инжиниринговый центр" в кузнечно-прессовом цехе ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА".

Выводы

1. При фиксированном времени торможения подвижной траверсы прессы перед ее остановкой в заданном положении время выполнения технологической операции (рабочего или возвратного хода) минимально при снижении скорости движения траверсы по степенному закону (20) в функции времени.

2. При наличии ограничения на абсолютную величину ускорения траверсы в процессе ее торможения при подходе к заданному положению наиболее рациональным является обеспечение снижения скорости движения траверсы по линейному закону (13) в функции времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Белов А.Ф., Розанов Б.В., Линц В.П. Объемная штамповка на гидравлических прессах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
- Ковка-Автомат: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610934 / В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов, А.А. Батулин, А.А. Досин, М.Е. Гойдо. 2002.
- Ульянов В.В., Прозоров Л.В. Выбор точек упреждения на пути движения траверсы ковочного прессы // Тяжелое машиностроение. 1990. № 2. С. 25–27.
- Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Батулин А.А., Гойдо М.Е. Опыт модернизации гидроприводов и систем управления прессов // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного производства и обработки материалов давлением — основы машиностроительного комплекса и национальной безопасности России: сб. докладов и материалов VIII Конгресса "Кузнец-2008". Рязань: ОАО "Тяжпрессмаш", 2008. С. 168–175.

Максим Ефимович Гойдо, канд. техн. наук,
 goido@cheltec.ru;

Валерий Владимирович Бодров, канд. техн. наук;

Рамиль Мерсеитович Багаутдинов;

Александр Алексеевич Батулин, канд. техн. наук