

ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.979-82.001.8

Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ НАГРЕТОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМ КОВОЧНЫМ КОЛОННЫМ ПРЕССОМ

Аннотация. В работе исследуются тепловые и механические процессы, возникающие в колоннах гидравлического ковочного пресса «United» (США) с усилием 22,5 МН в результате воздействия нагретой заготовки. Основное внимание уделено влиянию неравномерного нагрева колонн на напряженно-деформированное состояние элементов пресса, износ его узлов и снижению эксплуатационной точности оборудования. Для изучения термического воздействия была проведена серия замеров температуры поверхности колонн с использованием тепловизора Thermo CAM P60, обладающего высокой точностью измерений. Экспериментальные замеры подтверждают, что нагрев колонн по высоте и окружности неравномерен, что обусловлено процессами теплообмена между заготовкой и прессом, а также состоянием поверхности колонн (шероховатость, окисные пленки, смазочные слои). Последствия неравномерного нагрева включают возникновение дополнительных термических напряжений, перекос архитрава, усиленный износ направляющих втулок и уплотнений гидроцилиндров, а также увеличение напряжений в системе «архитрав-колонна-гайка». Эти факторы в длительной перспективе приводят к снижению жесткости пресса, уменьшению точности поковок и повышенной вероятности поломок дорогостоящих элементов оборудования. Для анализа термических процессов была изготовлена уменьшенная в 30 раз масштабная модель пресса. На модели исследовались тепловые деформации станины и влияние эксцентричного расположения заготовки на неравномерность нагрева колонн. Каркас для индикаторов часового типа был теплоизолирован для исключения влияния температуры. В заключении подчеркивается важность комплексного подхода к изучению условий работы колонных прессов, включая применение конечно-элементного моделирования и проведение масштабных исследований на работающем оборудовании.

Ключевые слова: гидравлический пресс, колонны пресса, тепловое воздействие, неравномерный нагрев, напряженно-деформированное состояние, износ узлов, точность поковок, термические напряжения, перекос архитрава, конечно-элементное моделирование

Продукция, изготавливаемая с использованием гидравлических ковочных прессов с колонной конструкцией станины (крупногабаритные поковки), обладает высокой востребованностью в современной промышленности. В условиях текущих геополитических и экономических реалий, включая введение санкционных ограничений и прекращение поставок крупногабаритных деталей для прессов от украинских производителей (таких как НКМЗ, Днепропресс и др.), обеспечение потребностей в высококачественных поковках с минимальными затратами становится приоритетной задачей. Для достижения этой цели необходимо поддерживать гидравлические прессы в максимально исправном и работоспособном состоянии на протяжении длительного времени.

Гидравлические прессы с колонной конструкцией станины относятся к категории оборудования для обработки материалов, которое эксплуатируется в условиях повышенных нагрузок. Такие условия включают вероятность смещения оси заготовки относительно оси пресса в процессе обработки, контакт с окалиной, а также воздействие высоких температур. Эти факторы в совокупности с продолжительным сроком эксплуатации оказывают негативное влияние

на долговечность комплектующих узлов и деталей пресса. Кроме того, они приводят к снижению геометрической точности изготавливаемых поковок, что может сказываться на качестве конечной продукции.

Принципиальная схема колонного гидравлического пресса приведена на рис. 1. Для того чтобы рабочий инструмент 10 произвел положительную работу над деталью 9, плунжер 6 толкается сжатой жидкостью, подаваемой в главный цилиндр 5. Плунжер, в свою очередь, толкает подвижную поперечину 3, которая перемещается вдоль направляющих колонн 7, жестко соединяющих неподвижные верхнюю 1 и нижнюю 2 поперечины. Для возврата подвижной поперечины в исходное верхнее положение гидропривод переключается и начинает подавать жидкость в возвратные цилиндры 4, толкающие вверх плунжеры 8.

Многочисленные исследования, посвященные повышению надежности колонных гидравлических прессов, в основном сосредоточены на изучении надежности базовых элементов конструкции при наличии эксцентриситета силы нагружения пресса в процессе обработки заготовки. Однако влияние таких факторов, как температура и окалина, на работу пресса остается недостаточно изученным. Между тем еще в середине XX века известный исследователь гидравлических прессов Э. Мюллер отмечал, что неравно-

© Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К., 2024

мерный нагрев колонн по их сечению и длине может вызывать значительные отклонения в распределении напряжений в материале колонн.

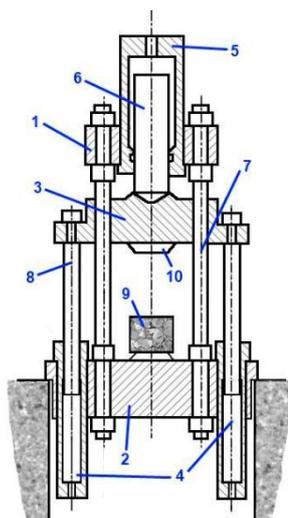


Рис. 1. Принципиальная схема колонного гидравлического пресса

Кроме того, неравномерность температурного распределения может наблюдаться не только в пределах одной колонны, но и между различными колоннами пресса. Это связано с эксцентриситетом расположения заготовки относительно центра пресса во время обработки.

Процесс теплообмена между горячей заготовкой и элементами пресса можно охарактеризовать как сложный и многокомпонентный. Во-первых, он является нестационарным, так как температурное поле в системе «пресс – заготовка» изменяется во времени. Во-вторых, теплообмен включает радиационно-конвективные процессы, в которых взаимодействуют тепловое излучение, конвекция и теплопроводность.

Согласно основным законам теплообмена, наибольшее влияние на нагрев деталей пресса оказывают процессы теплового излучения и теплопроводности. При этом передача тепла излучением зависит от множества факторов, включая форму, размеры, температуру и степень нагретости заготовки (плотность теплового потока), состояние поверхности элементов пресса, расстояние между заготовкой и прессом, а также другие параметры. Учет этих факторов имеет ключевое значение для оценки теплового воздействия на детали пресса и разработки методов повышения их надежности.

Плотность потока излучения (E , Вт/м²) является лучеиспускательной способностью тела и зависит от потока собственного излучения (Q , Вт) и площади излучения (F , м²):

$$E = \frac{dQ}{dF}, \quad (1)$$

Плотность потока собственного излучения тела (лучеиспускательная способность) называют и интегральной интенсивностью излучения тела.

Выражение интенсивности теплового излучения имеет следующий вид:

$$E = C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi \cos \alpha, \quad (2)$$

где C_0 – коэффициент, зависящий от физических свойств излучающей поверхности;

T_1 – абсолютная температура излучающей поверхности, К;

T_2 – абсолютная температура облучаемой поверхности, К;

$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$ – приведенная степень черноты излучающего и облучаемого тела;

φ – коэффициент, учитывающий долю облучения, падающего на тело;

α – угол падения лучей.

В случае близкого расположения излучающего и облучаемого тела (система «заготовка-пресс» попадает под это условие) выражение (1) принимает следующий вид:

$$E = C_0 \frac{F}{L^2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi \cos \alpha, \quad (3)$$

где F – площадь источника излучения, м²;

L – расстояние от источника излучения до облучаемого тела, м.

Поглощающая и отражающая способность элементов пресса определяется состоянием их поверхности, которое количественно характеризуется оптической шероховатостью. Оптическая шероховатость определяется как отношение высоты микронеровностей поверхности к длине волны падающего излучения. Неровности поверхности, в частности впадины между элементами шероховатости, способствуют увеличению поглощения падающего излучения за счет многократного внутреннего отражения.

Кроме того, наличие на поверхности деталей различных покрытий, таких как краска, окислы или смазочные материалы, значительно снижает их отражающую способность. Это приводит к увеличению степени черноты поверхности, что усиливает поглощение теплового излучения. Таким образом, состояние поверхности деталей пресса оказывает существенное влияние на процессы теплопередачи и, следовательно, на их тепловую нагрузку.

Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела представлена на рис. 2 и характеризуется потоком излучения Q – энергией, излучаемой за единицу времени со всей поверхности тела.

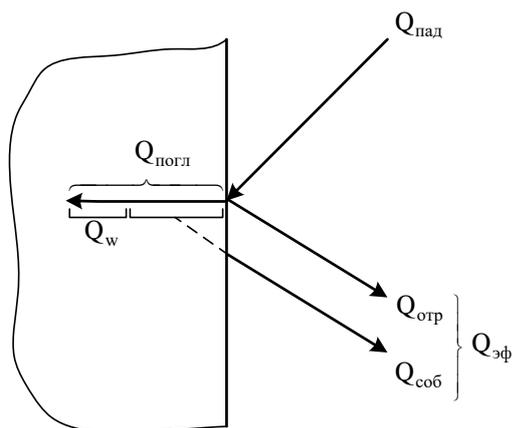


Рис. 2. Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела:

$Q_{пад}$ – поток излучения падающие на поверхность тела; $Q_{погл}$ – поток излучения, поглощенный телом; $Q_{отр}$ – поток излучения, отраженный от поверхности тела; $Q_{соб}$ – поток собственного излучения тела

Исследование температурного распределения на поверхности нагретой колонны гидравлического прессы «United» (США) с усилием 22,5 МН проводилось с использованием тепловизора **Thermo CAM P60** производства компании **Flir Systems** (США). Данный прибор обладает диапазоном измерения температур от -40 до $+1500^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$ или $\pm 2\%$ от показаний, что обеспечивает высокую точность измерений.

Экспериментальные замеры температур колонн проводились в процессе обработки стального слитка из стали 45, имеющего габариты: длина – 2500 мм, диаметр – 500 мм. Скорость перемещения бойка прессы составляла $V = 45$ мм/с, а время одного цикла работы прессы $n = 10$ циклов в минуту. Измерения температуры поверхности колонн выполнялись после определенного количества рабочих циклов прессы, результаты которых представлены на рис. 3 и 4.

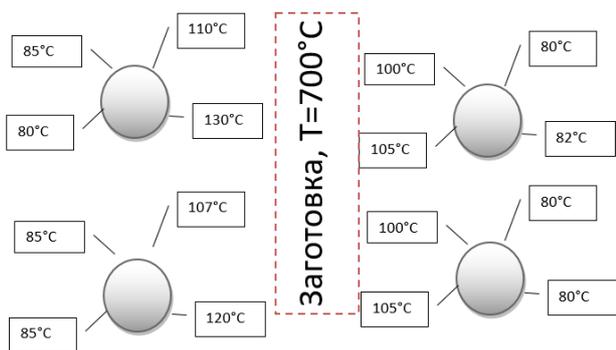


Рис. 3. Нагрев колонны прессы «United» США на высоте 100 мм от торца металлического кожуха

Геометрические параметры прессы следующие: расстояние между осями колонн прессы $a = 3658$ мм и $b = 1372$ мм; диаметр колонн $d = 457$ мм; полная высота колонн $H = 12\ 000$ мм; максимальное расстояние

между бойками $h_{max} = 1500$ мм; расстояние до траверсы $B = 500$ мм; высота траверсы $B = 750$ мм.



Рис. 4. Схема распределения температуры по высоте колонны прессы «United» США

Анализ результатов замеров показал, что температурное распределение на поверхности колонн по окружности и по высоте является неравномерным. Эта неравномерность обусловлена несколькими факторами:

- В процессе обработки заготовка теряет тепло неравномерно, что приводит к различным уровням теплового воздействия на колонны.

- При обработке слитка с симметричным расположением относительно колонн возникают различия в нагреве из-за неодинакового расстояния от поверхности заготовки до отдельных участков колонн.

- Поверхность колонн характеризуется классом шероховатости $R_z = 3,2-6,3$ мкм, а также наличием окисной пленки и смазочного слоя, которые влияют на их отражательную и поглощающую способность.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что нагрев колонн прессы зависит от сложного взаимодействия тепловых потоков между заготовкой и элементами прессы, а также от состояния поверхности колонн. Это требует учета данных факторов при анализе тепловых нагрузок и разработке методов повышения надежности оборудования.

Влияние теплопередачи во время выполнения технологических операцийковки значительно меньше, нежели лучистого теплообмена, что объясняется наличием в конструкции различного рода зазоров. Но тем не менее теплообмен путем теплопередачи осуществляется и наиболее наглядным примером является нагрев подвижной поперечины в результате ее соприкосновения с нагретыми до высокой температуры верхним бойком, аналогично происходит нагрев деталей подвижного стола, находящихся в зоне взаимодействия с нижним бойком.

Неравномерный нагрев колонн прессы приводит к возникновению дополнительных термических напряжений, которые накладываются на напряжения, вызванные приложением рабочей нагрузки, а также

на напряжения, обусловленные эксцентриситетом нагружения пресса. В результате это приводит к неравномерной выборке зазоров в направляющей системе пресса, что, в свою очередь, вызывает неравномерный износ направляющих втулок.

Перекося архитрава, возникающий в результате различий в нагреве колонн, усиливает износ направляющих втулок и уплотнений гидроцилиндров. Кроме того, это приводит к увеличению напряжений в системе контакта «архитрав-колонна-гайка». При длительной эксплуатации такие факторы становятся причиной снижения жесткости пресса, что приводит к ухудшению точности изготавливаемых поковок и увеличению вероятности поломок дорогостоящих базовых деталей пресса.

Для исследования процессов нестационарного радиационно-конвективного теплообмена, возникающих во время технологических операцийковки, была изготовлена масштабная модель пресса с уменьшением размеров в 30 раз (рис. 5). Для анализа деформации станины под воздействием нагрева к конструкции модели был дополнительно смонтирован каркас, на котором размещались индикаторы часового типа ИЧ 02. С целью исключения нагрева каркаса его поверхность была изолирована теплоизолирующим слоем, состоящим из минеральной ваты и фольги.



Рис. 5. Модель станины пресса

В рабочее пространство модели пресса помещалась заготовка цилиндрической формы (диаметр 16 мм), нагреваемая путем пропускания через нее электрического тока. Процесс, имитирующий размещение нагретой заготовки в рабочем пространстве пресса, а также схема теплоизоляции рамы модели от нагретых деталей представлены на рис. 6.

Для изучения зависимости неравномерности нагрева колонн от расположения заготовки проводилось смещение последней относительно центральной

оси пресса. Это позволило проанализировать влияние эксцентриситета заготовки на тепловое распределение в колоннах и выявить механизм формирования термических напряжений, вызывающих перекося архитрава и ускоренный износ компонентов пресса. Данные по замерам температуры колонн при центральном размещении нагретой заготовки и смещенном приведены в табл. 1.



Рис. 6. Процесс, имитирующий расположение нагретой заготовки в рабочем пространстве пресса, и теплоизоляция рамы от нагретых деталей модели пресса

Параллельно с замерах температуры производился съем показаний с индикаторов, фиксирующих деформацию станины в результате неравномерного нагрева колонн. Данные индикаторов приведены в табл. 2. Как видно по результатам замеров, неравномерный нагрев колонн вызывает неравномерное удлинение колонн, соответственно, перекося архитрава. Это вызывает необходимость экранирования теплового излучения нагретой заготовки.

Зависимость нагрева колонн от расположения нагретой заготовки

Расположение поковки относительно оси прессы, мм	Температура заготовки, °С	Продолжительность эксперимента, мин	Температура колонны №1, °С	Температура колонны №2, °С	Температура колонны №3, °С	Температура колонны №4, °С
0	1000	5	190	192	190	191
0,5	1000	5	181	184	205	200
1	1000	5	175	179	230	220

Примечание. Смещение нагретой заготовки производилось в сторону колонн 3, 4.

Деформация станины прессы в результате нагрева колонн

Температура колонны №1, °С	Температура колонны №2, °С	Температура колонны №3, °С	Температура колонны №4, °С	Индикатор №1, мкм	Индикатор №2, мкм	Индикатор №3, мкм	Индикатор №4, мкм
25	25	25	25	0	0	0	0
155	162	205	200	81	81,5	81,5	82
160	170	205	203	83	84,8	89,9	85
165	170	214	210	84	85	94,2	92
170	173	228	215	85	86	115	96
175	179	230	220	85	87	130	115

Примечание. Нумерация индикаторов соответствует номерам колонн прессы и каждый индикатор располагается непосредственно над соответствующим торцом колонны.

Заключение

В статье подчеркнута необходимость применения комплексного подхода к исследованию условий эксплуатации колонного гидравлического прессы. Такой подход позволяет учитывать взаимодействие различных факторов, влияющих на надежность и долговечность оборудования.

Приведены результаты исследований теплового воздействия нагретой заготовки на детали и узлы колонного прессы. Установлено, что неравномерный нагрев колонн приводит к дополнительным термическим напряжениям, перекоосу архитрава, ускоренному износу направляющих втулок, уплотнений гидроцилиндров и других элементов, что в конечном итоге снижает жесткость прессы и точность изготовления поковок.

Выявлена целесообразность проведения дальнейших исследований условий работы ковочных прессов с учетом комплексного влияния различных факторов. Для этого рекомендуется привлекать современные программные инструменты для конечно-элементного моделирования тепловых и механических процессов, а также проводить масштабные эксперименты на работающем промышленном оборудовании. Такой подход позволит повысить точность анализа и разработать рекомендации по увеличению надежности и долговечности ковочных прессов.

Список источников

1. Мюллер Э. Гидравлические прессы. М.: Машгиз, 1959.
2. Сурков И.А. Установление причин и предупреждение разрушений колонн мощных гидравлических прессов // КШП. ОМД. 2004. №3. С 42-45.
3. Луканин В.Н. Теплотехника. М.: Высш. шк., 1999.
4. Новиков В.И., Кадошников В.И. Моделирование тепловой деформации колонн ковочного прессы // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й Межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2013. С. 354-356.
5. Новиков В.И., Кадошников В.И., Куликова Е.В. Повышение надежности работы деталей, отвечающих за перемещение подвижной поперечины в гидравлическом ковочном прессы // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2012. №2. С. 24 -28.
6. Прогнозирование термонапряженного состояния цилиндрического объекта в процессе его термообработки / Савинов А.С., Харченко М.В., Ангольд К.В., Рудь К.И. // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 4-9.
7. Ефимов А.В. Влияние внешних воздействий на структуру и свойства стальных отливок // Теория и технология металлургического производства. 2018. №3(26). С. 8-11.

Сведения об авторах

Андросенко Мария Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.androsenko@magtu.ru

Савельева Ирина Александровна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Москвина Елена Алексеевна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Куликов Семен Сергеевич – бакалавр, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Новиков Валерий Иванович – инженер, ООО «Механоремонтный комплекс», Магнитогорск, Россия.

Емелюшин Алексей Николаевич – профессор, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: emelushin.magtu.ru

Дубровин Виталий Константинович – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vkdubr@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INVESTIGATION OF NON-STATIONARY HEAT TRANSFER BETWEEN A HEATED WORKPIECE AND A HYDRAULIC FORGING COLUMN PRESS

Androsenko Maria V. – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.androsenko@magtu.ru.

Savelyeva Irina A. – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Moskvina Elena A. – Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kulikov Semyon S. – Bachelor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Novikov Valery I. – Engineer at LLC «Mechanoremontny Kompleks», Magnitogorsk, Russia.

Emelyushin Alexey N. – Dr. Eng., Prof. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: emelushin.magtu.ru

Dubrovin Vitaly K. – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vkdubr@mail.ru.

Abstracts. This study investigates the thermal and mechanical processes occurring in the columns of the "United" (USA) hydraulic forging press with a force of 22.5 MN due to the influence of a heated workpiece. The focus is on the impact of non-uniform heating of the columns on the stress-strain state of the press elements, wear of its components, and the reduction in operational precision of the equipment. To analyze the thermal effects, a series of surface temperature measurements were conducted using the Thermo CAM P60 thermal imager, which provides high measurement accuracy. Experimental data confirm that the temperature distribution along the height and circumference of the columns is non-uniform, due to heat exchange between the workpiece and the press, as well as the surface condition of the columns (roughness, oxide films, and lubrication layers).

The consequences of uneven heating include the formation of additional thermal stresses, misalignment of the crosshead, accelerated wear of guide bushings and hydraulic cylinder seals, as well as increased stresses in the "crosshead-column-nut" system. Over prolonged operation, these factors lead to a reduction in press rigidity, decreased forging accuracy, and a higher likelihood of failures in expensive press components.

To investigate thermal processes, a scale model of the press, reduced by a factor of 30, was created. The model was used to study thermal deformations of the frame and the effect of eccentric placement of the workpiece on the uneven heating of the columns. The frame for dial-type indicators was thermally insulated to avoid temperature influence. The conclusion emphasizes the importance of a comprehensive approach to studying the operating conditions of column presses, including the use of finite element analysis and large-scale experiments on operational equipment.

Keywords: hydraulic press, press columns, thermal impact, non-uniform heating, stress-strain state, component wear, forging accuracy, thermal stresses, crosshead misalignment, finite element modeling

Ссылка на статью:

Исследование нестационарного теплообмена между нагретой обрабатываемой заготовкой и гидравлическим ковочным колонным прессом / Андросенко М.В., Савельева И.А., Москвина Е.А., Куликов С.С., Новиков В.И., Емелюшин А.Н., Дубровин В.К. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 49-55.

Androsenko M.V., Savelyeva I.A., Moskvina E.A., Kulikov S.S., Novikov V.I., Emelyushin A.N., Dubrovin V.K. Investigation of non-stationary heat transfer between a heated workpiece and a hydraulic forging column press. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 49-55.