

УДК 669.01:621.226

В. И. Гануш

Национальная металлургическая академия
Украины

Н. П. Островерхов, А. В. Султан,

Е. М. Дзичковский, А. Е. Кривчиков

Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта

V. I. Ganush

National metallurgical academe of Ukraine

N. P. Ostroverhov, A. V. Sultan,

E. M. Dzichkovyy, A. E. Krivchikov

National university of railway transport of
Dnepropetrovsk

Исследование нагруженности и напряженности базовых элементов тяжелых гидравлических прессов металлургического производства

Research loading and tension of basic elements of heavy hydraulic presses for metallurgical production

Приведено исследование нагруженности и напряженности таких элементов тяжелых гидравлических прессов, как станина, колонны, стяжки. Рассчитан коэффициент запаса термической затяжки стяжек пресса. (Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.).

Ключевые слова: пресс, колонна, станина, стяжка, нагружение, напряжение, термическая затяжка.

Is shown research loading and tension of items heavy hydraulic presses such as frame, columns, screed. The coefficient of thermal reserve tightening ties press.

Key words: press, column, frame, screed, loading, stress, thermal tighten.

Постановка задачи

В металлургии для обработки металлов давлением используется широкая гамма гидравлических прессов, развивающих усилие до 1000 МН. Их масса может достигать более 20 тысяч тонн, а масса отдельных базовых элементов, формирующих станину, превышает сотни тонн. Несмотря на быстрое развитие металлургических технологий, значительная номенклатура оборудования для их осуществления имеет весьма длительный срок морального старения. Это относится, в первую очередь, к базовым несущим конструкциям, поскольку системы привода и управления машин, как правило, подвергаются модернизации. Замена отработавшего амортизационный срок службы оборудования полностью сопряжена с существенными расходами. Поэтому подобные объекты проходят процедуру продления ресурса, которая обосновывается исследованием их технического состояния и оценкой остаточного ресурса [1–3].

Цель работы

Исследование распределения усилий (внешних и затягивающих) в колоннах прессов и напряжений в деталях прессов сложной конфигурации (ползун, архитрав), результаты которых

являются исходными для оценки остаточного ресурса.

Измерение напряжений и усилий в колоннах пресса 100 МН

Равномерность нагруженности колонн пресса является важнейшим показателем надежности и долговечности его работы. Для оценки равномерности нагруженности колонн использовался метод электротензометрии, являющийся наиболее точным при оценке фактической нагруженности конструкции пресса.

В качестве регистрирующей аппаратуры при проведении работ использовался измерительный комплекс, состоящий из усилителя ТМА32 и персонального компьютера с аналогово-цифровым преобразователем, который позволяет производить измерения одновременно по 32 каналам с частотой опроса по каждому каналу 200 Гц.

В качестве датчиков использовались тензорезисторы типа КФ5П1-5-200-А-12 с базой 5 мм и внутренним сопротивлением 200 Ом.

Основными несущими элементами всех трех прессов являются: опертая на железобетонный фундамент станина; к станине посредством шестнадцати полугаек прикреплены четыре ко-

лонны; в верхней части колонн, также посредством полугаек, прикреплен архитрав, в теле которого размещен подвижный рабочий поршень; в нижней части поршня имеется траверса, одетая на колонны.

На четырех колоннах в месте выше верхних полугаек крепления колонн к станине были наклеены тензорезисторы. Принятая нумерация колонн пресса, а также схема установки и нумерация датчиков приведены на рис. 1.

Тензорезисторы посредством измерительных сетей были соединены с измерительной аппаратурой (усилитель ТМА32 и ПК). После чего была проведена тарировка тензорезисторов и были определены масштабы измеряемых процессов.

Ввиду того, что на момент проведения работ колесопрокатная линия не была запущена целиком, измерения производились при номинальном рабочем давлении пресса с «холодной» заготовкой.

После обработки средних измеренных напряжений в колоннах пресса можно сделать выводы:

- суммарное измеренное усилие пресса составило 79,93 МН;
- наибольшие усилия 25,48 МН и 26,09 МН возникают в колоннах № 2 и 4 соответственно, что составляет 65% от усилия, создаваемого прессом;
- оставшиеся 35% от суммарного усилия воспринимают колонны № 1 и 3, соответственно, 14,84 МН и 13,52 МН;

- во всех колоннах величины отклонения от средней нагрузки превышают допустимое ($\pm 15\%$) почти в 2 раза;

- максимальная величина отношения изгибных напряжений к растягивающим, составляющая 45,9% в колонне № 1, превышает нормативное значение 30%.

Поэтому было принято решение о проведении дополнительной термозатяжки колонны № 1 в теле станины и повторных измерений усилий в колоннах пресса 100 МН.

Методика проведения измерений напряжений и усилий в колоннах пресса 100 МН и принятая нумерация колонн пресса, а также схема установки и нумерация датчиков остались прежними (см. рис. 1).

Всего было произведено 6 опытов.

На рис. 2 показаны направления векторов максимальных изгибающих моментов в колоннах и направления (вектора) действия суммарных максимальных напряжений, полученные путем поворота против часовой стрелки на угол 90° векторов максимальных моментов.

После обработки средних измеренных напряжений в колоннах пресса, полученных после дополнительной термозатяжки колонны № 1, можно сделать выводы:

- суммарное измеренное усилие пресса составило 75,55 МН;
- максимальное усилие, равное 21,21 МН, возникает в колонне № 4;
- минимальное усилие, равное 17,09 МН, возникает в колонне № 3;

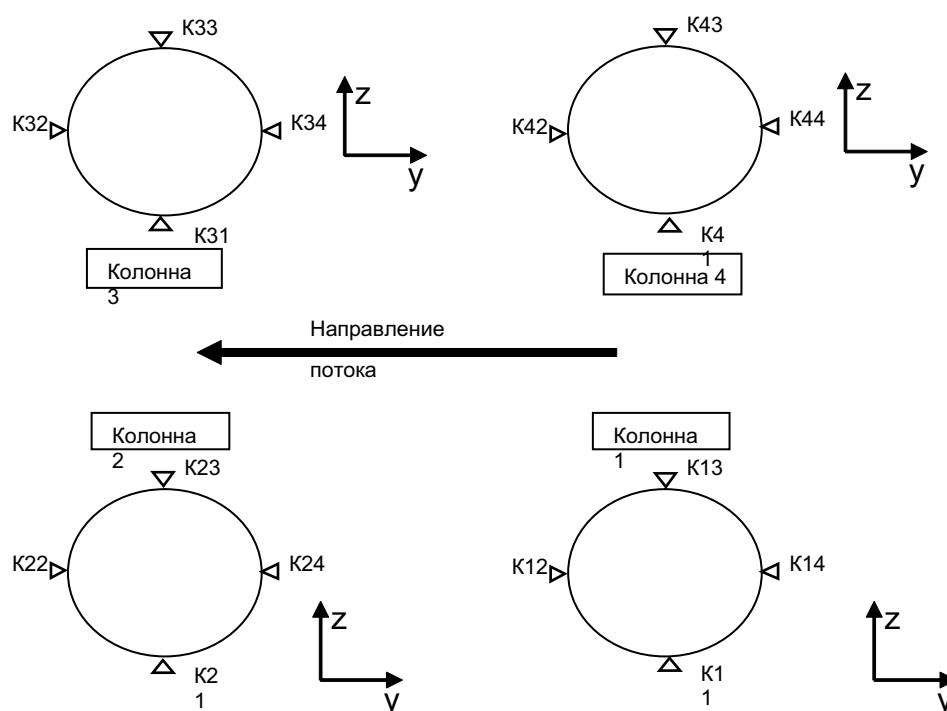


Рис. 1. Схема размещения тензорезисторов на колонных прессах 100 МН

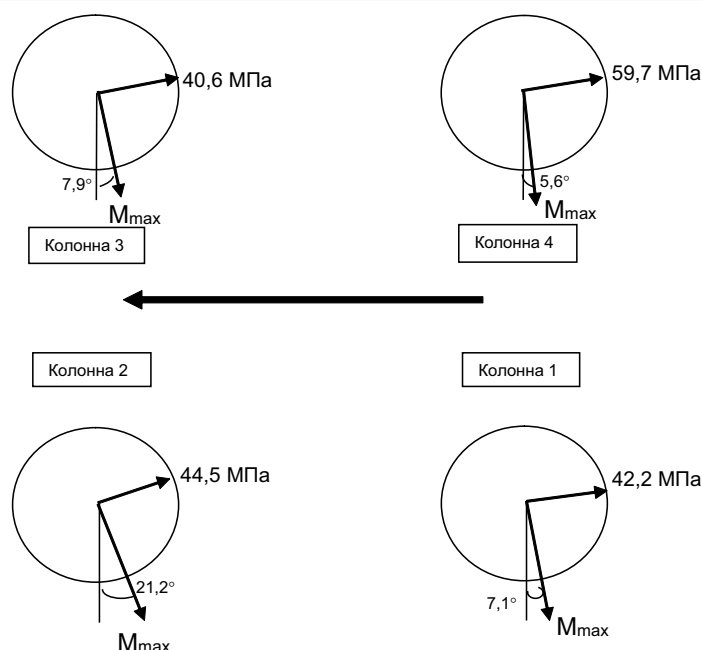


Рис. 2. Направления векторов максимальных изгибающих моментов и векторов действия суммарных максимальных напряжений

– отклонение нагрузки от среднего значения изменяется от $-9,5\%$ в колонне № 3 до $+12,2\%$ в колонне № 4;

– максимальная величина отклонения от средней нагрузки находится в допустимых пределах ($\pm 15\%$);

– максимальная величина отношения изгибных напряжений к растягивающим, составляющая $41,5\%$ в колонне № 4, превышает нормативное значение 30% , что может быть связано с недостаточной термозатяжкой колонны № 3 или с неравномерным контактом станины прессы с гайками.

Измерение напряжений и усилий в проставках стяжек прессы 100 МН

Усилие прессы 100 МН, создаваемое давлением главного цилиндра, по цепи «поперечина – стяжки – архитрав» передается на колонны.

Между поперечиной и архитравом установлены 8 цилиндрических проставок. Через поперечину, проставки и архитрав продеты 8 стяжек, каждая из которых стянута двумя наружными гайками. Такое соединение является статически неопределимой системой, в которой распределение усилий между отдельными элементами силовой цепи зависит от соотношения их жесткостей. Соединение должно обеспечивать нераскрытие стыков при действии максимально допустимой нагрузки, что можно обеспечить только термической затяжкой стяжек.

При приложении к предварительно сжатому соединению «поперечина – проставки – архитрав» рабочей нагрузки сжимающее усилие ослабевает (с учетом знака напряжения увели-

чиваются), а предварительно растянутые стяжки дополнительно растягиваются. Таким образом, усилие, создаваемое прессом, распределяется между цепочками «поперечина – стяжки – архитрав» и «поперечина – проставки – архитрав» согласно соотношению их жесткостей.

Несмотря на наличие в проставках по одному отверстию, что позволяет разместить на стяжках по одному тензодатчику, оценить добавки усилия в стяжках в рабочем режиме не представляется возможным из-за изгиба стяжек, наличие которого подтвердилось расчетным путем по полной конечно-элементной модели прессы 100 МН, которая будет приведена ниже. Кроме того, при недостаточной термозатяжке стяжек между поперечиной и проставками возможно появление зазоров при работе прессы, что недопустимо.

Измерения напряжений в проставках прессы 100 МН проводились одновременно с измерениями напряжений в колоннах. На каждой проставке были установлены по одному датчику напряжений и перемещений. Датчики перемещений крепились к проставкам над датчиками напряжений и контролировали возможное появление зазоров между проставками и поперечиной.

Схема размещения измерительных приборов, их обозначения и нумерация стяжек показаны на рис. 3.

После обработки полученных средних напряжений в проставке можно сделать выводы:

– отклонение измеренных напряжений от среднего значения изменяется от $-79,5\%$ в проставке № 2 до $+115,1\%$ в проставке № 3;

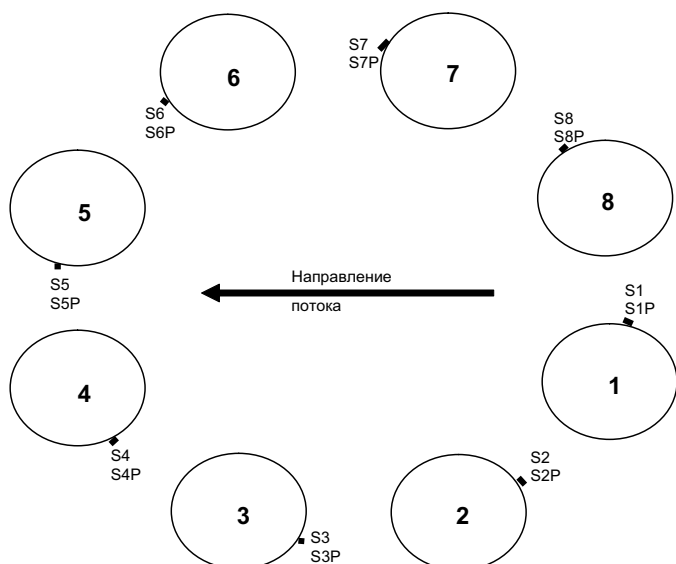


Рис. 3. Схема размещения измерительных приборов (S – напряжения, SP – перемещения) на проставках пресса 100 МН

– в 5 проставках из 8 величины отклонения напряжений от среднего значения превышают нормативное ($\pm 15\%$).

Поэтому было принято решение о проведении дополнительной термозатяжки стяжек № 2, 5 и 4 и повторных измерений напряжений в проставках пресса 100 МН.

Повторные замеры напряжений в проставках пресса 100 МН были проведены параллельно с замерами напряжений в колоннах.

При проведении повторных измерений напряжений в проставках пресса 100 МН на каждую проставку были установлены по два тензорезистора. Принятая нумерация проставок пресса, а также схема установки и нумерация датчиков напряжений приведены на рис. 4.

Расположение датчиков напряжений, показанное на рис. 4, позволяет более точно определять продольные усилия, воспринимаемые проставками, исключив при этом их внецентренное растяжение-сжатие, вызванное «выпучиванием» поперечины (тангенциальный изгиб). При этом внецентренное растяжение-сжатие проставок, обусловленное неравномерностью термической затяжки стяжек (радиальный изгиб), контролируется. Направления осей тангенциального (τ) и радиального (ρ) изгибов для проставки № 1 показаны на рис. 4.

Датчики перемещений на проставках при повторных замерах не устанавливались.

Методика проведения измерений напряжений в проставках пресса 100 МН осталась прежней.

Всего было произведено 6 опытов.

После обработки средних измеренных напряжений в проставке, полученных после до-

полнительной термозатяжки стяжек № 2, 5 и 4, можно сделать выводы:

- суммарное среднее измеренное усилие, воспринимаемое проставками, 43,87 МН составляет 58,07% от суммарного среднего рабочего усилия пресса 75,55 МН, измеренного по напряжению в колоннах в тех же опытах;
- максимальное усилие, равное 7,11 МН, воспринимается проставкой № 5;
- минимальное усилие, равное 0,63 МН, воспринимается проставкой № 6;
- отклонение нагрузки от среднего значения изменяется от $-88,6\%$ в проставке № 6 до $+29,6\%$ в проставке № 5;
- максимальная величина отклонения от среднего усилия в проставках № 1, 3, 5 и 6 превышает нормативное ($\pm 15\%$);
- максимальная величина отношения изгибных напряжений к растягивающим, составляющая 48,9% в проставке № 2, превышает допускаемое значение 30%.

По усилиям, измеренным в колоннах и проставках, можно определить усилия, воспринимаемые стяжками по формуле:

$$N_c = (41,93 / 58,07) \cdot N_n = 0,72206 \cdot N_n, \quad (1)$$

где N_c , N_n – усилия, воспринимаемые стяжкой и ее проставкой соответственно.

Следует отметить, что средняя термозатяжка стяжек, за исключением стяжки № 6, удовлетворительна.

При первой термозатяжке стяжек в последовательности № 8, 4, 5, 1, 2, 6, 7, 3 термозатяжка была произведена (при проектной длине дуги по наружной образующей резьбы 898 мм, что соответствует температуре термозатяжки стяжек $+108^\circ\text{C}$) на следующие величины (табл. 1).

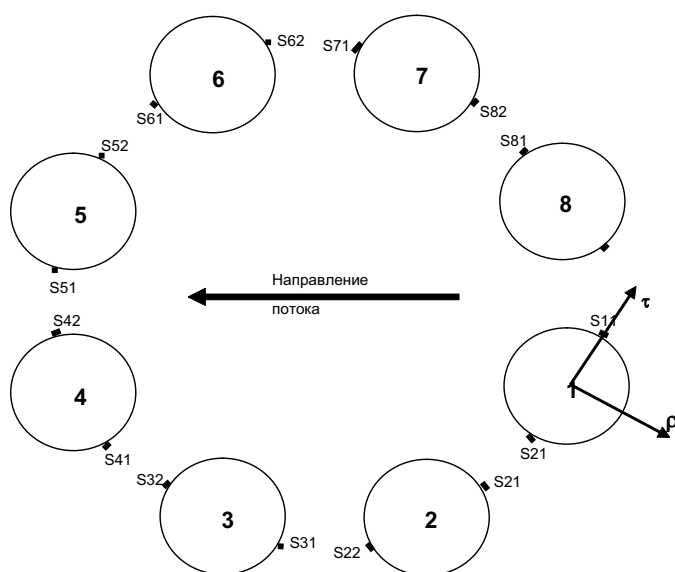


Рис. 4. Схема размещения датчиков напряжения на проставках пресса 100 МН

Таблица 1
Величина термозатяжки стяжек

1	2	3	4	5	6	7	8
700	690	710	710	720	750	720	680
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм

Данная термозатяжка стяжек пресса 100 МН соответствует термозатяжке на +85 °С по отношению температуры окружающей среды.

Анализ результатов замеров напряжений в проставках пресса 100 МН и данных по уровням термозатяжки его стяжек позволяет сделать вывод, что работа стяжек зависит не только от уровня их термозатяжки, но и от последовательности ее проведения.

Термозатяжка стяжек пресса в последовательности № 8, 4, 5, 1, 2, 6, 7, 3 не является оптимальной из-за несоблюдения симметрии.

Симметрия термозатяжки стяжек пресса будет соблюдаться, если ее производить, например, в последовательности № 8, 4, 2, 6, 7, 3, 5, 1.

Расчет на прочность станины пресса 100 МН при действии фактических нагрузок

Расчет на прочность станины пресса 100 МН проводился методом конечных элементов с использованием программного комплекса NASTRAN.

Производилось два расчета:

1) при равномерном нагружении станины пресса фактической (измеренной) нагрузкой $18,9 \cdot 4 = 75,6$ МН, что составляет 75,6% от номинальной мощности пресса;

2) при нагружении станины пресса фактическими усилиями в колоннах, измеренными в натурных опытах:

1-я колонна – 19,2 МН; 2-я колонна – 18,1 МН; 3-я колонна – 17,1 МН; 4-я колонна – 21,2 МН.

Оба расчета производились для станины с четырьмя колоннами и моделированием термозатяжки колонн в станине на 40°. Колонны моделировались целиком с гайками, служащими для их термозатяжки в станине и архитраве. На уровне архитрава колоннам запрещались горизонтальные перемещения, и к их верхним концам прикладывались соответствующие продольные усилия. Вертикальные перемещения запрещались опорам станины, а в ее средней части прикладывалось суммарное усилие 75,6 МН. Расчетная схема станины пресса 100 МН приведена на рис. 5.

На рис. 6 приведены поля эквивалентных напряжений на поверхности станины пресса 100 МН при действии фактических (измеренных) усилий в колоннах.

Как видно из результатов расчетов, максимальные эквивалентные напряжения:

– в верхнем поясе не изменились и остались на уровне 154 МПа;

– в отверстиях вертикальных ребер выросли со 134 МПа до 138 МПа – на 3,0%;

– в нижнем поясе не изменились и остались на уровне 64 МПа.

Из вышесказанного следует, что существующая на данный момент неравномерность нагруженности колонн пресса 100 МН практически не влияет на несущую способность станины пресса.

Станина пресса 100 МН изготовлена из стали 35Л, имеющей предел текучести $\sigma_t = 350$ МПа и предел прочности $\sigma_b = 590$ МПа.

Расчет коэффициента запаса термической затяжки стяжек пресса 100 МН

Усилие пресса 100 МН, создаваемое давлением главного цилиндра, посредством пробки прикладывается к нижней поверхности поперечины и по цепи «поперечина – стяжки – архитрав» передается на колонны и станину.

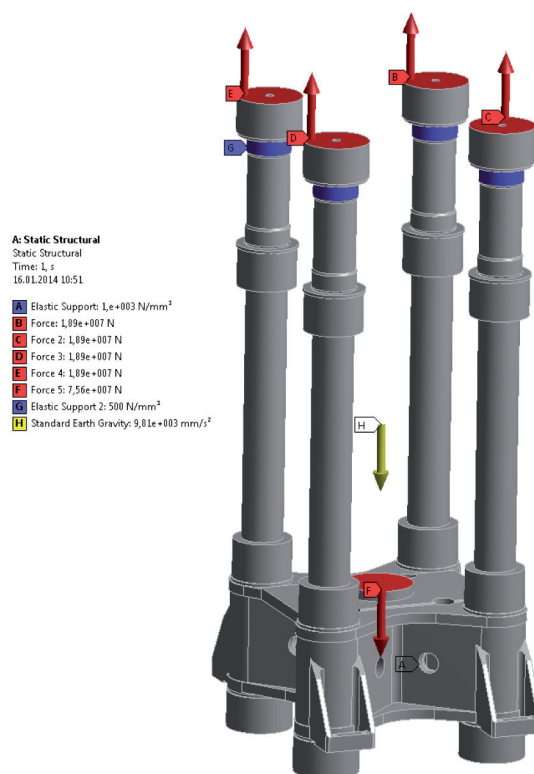


Рис. 5. Расчетная схема станины пресса 100 МН

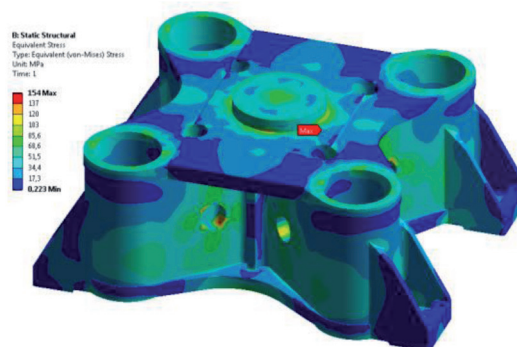


Рис. 6. Поле эквивалентных напряжений в станине пресса 100 МН при фактическом нагружении (вид сверху)

Как отмечалось выше, между поперечной и архитравом установлены 8 цилиндрических проставок. Через поперечину, проставки и архитрав продеты 8 стяжек, каждая из которых стянута двумя наружными гайками. Такое соединение является статически неопределимой системой, в которой распределение усилий между отдельными элементами силовой цепи зависит от соотношения их жесткостей. Соединение должно обеспечивать не раскрытие стыков при действии максимально допустимой нагрузки, что можно обеспечить только термической затяжкой стяжек.

При нагружении предварительно сжатого соединения «поперечина – проставки – архитрав» рабочей нагрузкой сжимающее усилие ослабевает (с учетом знака напряжения увеличиваются), а предварительно растянутые стяжки дополнительно растягиваются. Таким образом, усилие, создаваемое прессом, распределяется между цепочками «поперечина – стяжки – архитрав» и «поперечина – проставки – архитрав» согласно соотношению их жесткостей.

Коэффициент запаса термозатяжки стяжек пресса k определялся из отношения усилия термозатяжки проставок к усилию разгрузки проставок пресса в рабочем режиме.

С целью определения вышеуказанных усилий были проведены два расчета на полной конечноэлементной модели пресса 100 МН:

- расчет термической затяжки стяжек пресса при их нагревании по отношению к температуре окружающей среды на 85 °С;

- расчет пресса в рабочем режиме на действие нагрузки 100 МН при термической затяжке стяжек на 85 °С.

В стяжках при термической затяжке стяжек на 85 °С средние нормальные напряжения составили 125 МПа, в проставках –91 МПа.

При термической затяжке стяжек на 85 °С и реализации усилия в прессе 100 МН средние нормальные напряжения составили 146 МПа, в проставках –41,5 МПа.

Из полученных расчетных данных следует, что при реализации прессом усилия 100 МН и равномерной термической затяжке стяжек средние нормальные напряжения возрастают:

- в стяжках на 21 МПа;
- в проставках на 49,5 МПа.

Следовательно, при равномерной термической затяжке стяжек каждая из 8 стяжек воспринимает усилие $N_c = \sigma_c \cdot A_c = 21 \cdot 0,1389 = 2,92$ МН. Усилие, воспринимаемое одной проставкой, равно: $N_n = \sigma_n \cdot A_n = 49,5 \cdot 0,190 = 9,41$ МН. Здесь A_c, A_n – площади поперечных сечений стяжек и проставок соответственно.

Если просуммировать усилия, воспринимаемые восьмью стяжками и проставками, то должны получить усилие, создаваемое прессом в рабочем режиме:

$$N_{\text{пресса}} = (N_c + N_n) \cdot 8 = (2,92 + 9,41) \cdot 8 = 98,64 \text{ МН. (2)}$$

Таким образом, коэффициент запаса термической затяжки стяжек пресса k , определяемый как отношение усилия термозатяжки проставок к усилию разгрузки проставок пресса в рабочем режиме, при температуре термической затяжки на 85 °С и рабочем усилии 100 МН, равен:

$$k = 91 / (91 - 41,5) = 1,84. \quad (3)$$

Следует отметить, что с уменьшением рабочего усилия пресса, коэффициент запаса термической затяжки стяжек k линейно растет.

Во время повторных замеров напряжений в колоннах и проставках пресса 100 МН, проведенных после проведения дополнительной термической затяжки колонны № 1 и проставок № 2, 5 и 4, среднее усилие, реализованное прессом в 6 опытах, оказалось равным 75,55 МН. Следовательно, средние добавки нормальных напряжений в проставках, при условии равномерной термической затяжки стяжек, должны были равняться:

$$\Delta\sigma_n = 49,5 \cdot 0,7555 = 37,4 \text{ МПа. (4)}$$

По результатам измерений напряжений в колоннах и проставках пресса 100 МН, средние нормальные напряжения в проставках увеличивались (табл. 2).

Особо следует отметить стяжку № 6, которая по результатам измерений после дозатяжки стяжек № 2, 5 и 4 практически выключилась из работы пресса:

- 1) термическая затяжка стяжки № 6 была произведена на 750 мм (длина дуги поворота гайки по наружной образующей резьбы) при среднем значении – 710 мм;

- 2) по результатам замеров напряжений в колоннах и проставках пресса 100 МН добавка

Таблица 2

Увеличение средних нормальных напряжений в проставках

1	2	3	4	5	6	7	8
36,7 МПа (-1,9%)	28,9 МПа (-22,8%)	37,1 МПа (-0,8%)	28,6 МПа (-23,5%)	37,4 МПа (0%)	3,3 МПа (-91,2%)	29,4 МПа (-21,4%)	28,9 МПа (-22,8%)

Примечание. В скобках даны отклонения напряжений в % от расчетной величины

нормального напряжения в проставке стяжки № 6, равная 54,2 МПа, была больше 51,2 МПа – средней величины добавок напряжений для 8 проставок;

3) после дозатяжки стяжек № 2, 5 и 4 добавка нормального напряжения в проставке № 6 в 1-м опыте составила 9 МПа, а в последнем, 6-м, опыте всего 3 МПа. На противоположенной стороне проставки № 6 добавки напряжений практически равнялись 0.

Выводы

На основании вышесказанного, можно предположить, что стяжка № 6 потеряла свою несущую способность и находится на стадии усталостного разрушения. Чтобы убедиться в противном, нужно произвести дефектоскопию стяжки № 6.

По результатам дефектоскопии может оказаться, что проставка № 6 не подвержена усталостному разрушению. Тогда нужно произвести ее термическую дозатяжку.

Вышесказанное свидетельствует о том, что уровень нагруженности стяжек прессы 100 МН зависит не только от величины их термозатяжки, но и от последовательности ее проведения. Более предпочтительна термозатяжка стяжек прессы с соблюдением симметрии, например, в последовательности № 1, 5, 3, 7, 8, 4, 2, 6.

Библиографический список

1. Пасечник Н. В. Обеспечение прочностной надежности металлургических машин [Электронный ресурс] / Н. В. Пасечник, И. А. Сурков // Тяжелое машиностроение. – 2007. – Режим доступа: www.nadezhnost.com
2. Корнилова А. В. Определение общей долговечности и остаточного ресурса объекта по критерию многоциклового усталости / А. В. Корнилова // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – С. 47–51.
3. Корнилова А. В. К вопросу о комбинировании методов неразрушающего контроля. / А. В. Корнилова // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – С. 49–54.

