

## **Экспериментальное исследование напряженного состояния в соединении базовых и корпусных деталей обратимой сборочно-сварочной оснастки**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению напряжений, действующих в опасных сечениях элементов соединения, выявление общих картин их распределения и схем работы отдельных элементов базовых и корпусных деталей универсальных сборно-разборных приспособлений для проведения сварочных работ с целью оценки их прочности. Получена с помощью поляризационно-оптического метода исследований реальная картина распределения напряжений в соединениях базовых элементов приспособлений, которые оказались ниже показателей допустимых напряжений.

**Ключевые слова:** сборно-разборные приспособления, сборка, сварка, напряжения, объемные модели, поляризационно-оптический метод, клиновое соединение.

### **Введение**

Современное машиностроительное производство характеризуется применением на предприятиях большинства отраслей (авиастроение, приборостроение, двигателестроение и т. д.) в основном специальной технологической оснастки. В условиях постоянно растущих требований к эффективности и интенсификации производства в условиях рыночной экономики применение специальной оснастки ведет к увеличению затрат на подготовку производства и удлинению сроков производства новых изделий от 2 до 4 лет.

Вышеизложенное касается производства сборно-сварных конструкций, так как применение неразборных сварочных приспособлений не удовлетворяет растущим требованиям к современным технологиям и в значительной мере тормозит технологический процесс.

### **1. Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций**

По данным ряда работ [1, 2] наибольший эффект достигается за счет использования переналаживаемых видов технологической оснастки, так как она основана на принципе длительной обрабатываемости и высокой оборачиваемости ее составных элементов.

Работоспособность универсальных сборно-разборных сварочных приспособлений (УСРПС) определяется, как показали теоретические исследования [3, 4], равнопрочностью основных соединительных элементов. Установлено, что по условиям нагружения наиболее эффективным является клиновое соединение.

В этом соединении в виду клиновой формы исполнения крепежных элементов создаются весьма значительные усилия, действующие на элементы приспособления и вызывающие в них появление дополнительных напряжений. В результате чего, общие напряжения могут превысить допускаемые величины и вызвать потерю прочности элементов приспособления.

**Цель работы** — определение напряжений, действующих в опасных сечениях элементов соединения, выявление общих картин распределения напряже-

ний и схем работы отдельных элементов базовых и корпусных деталей под нагрузкой для последующей оценки их прочности. Объектом исследования являлось клиновое соединение элементов УСРПС серии I.

## 2. Изложение основного материала

В соответствии с поставленной целью для проведения исследований был применен поляризационно-оптический метод [5, 6], относящийся к числу методов моделирования и заключающийся в использовании упруго-оптического эффекта для измерения напряжений в моделях из прозрачного материала, выполненных геометрически подобными исследуемым конструкциям. Применение данного метода позволило относительно просто получить качественную и количественную картины распределения напряжений в исследуемых конструкциях.

Оптическое моделирование осуществляли с помощью метода «замораживания» деформаций в моделях [6], сущность которого состоит в том, что при нагреве многофазного материала модели до 353...413 К одна его фаза (в молекулярных объемах) размягчается, а прикладываемую к модели нагрузку принимает на себя неразмягчающийся скелет. Если, не снимая нагрузки, модель охладить до комнатной температуры, то размягчившаяся при нагреве фаза затвердевает – «замораживается» – и после снятия нагрузки удерживает полученную скелетом деформацию. Эта деформация сохраняется и в тонких пластинках-срезах после вырезки их из модели. Просвечивание вырезанных срезов поляризованным светом позволяет определить картину распределения и величину главных контурных напряжений.

Исследования проводили на объемных моделях из оптически чувствительного материала (табл. 1) на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной полиэтиленполиамином.

Таблица 1

Физико-механические свойства материала моделей

Показатели	Обозначение	Единица измерения	Значение показателей	
			в твердом состоянии	в эластичном состоянии
Модуль упругости	$E$	МПа	2500	28
Коэффициент Пуассона	$\mu$	—	0,4	—
Предел прочности при растяжении	$\sigma_p$	МПа	60	—
Оптическая постоянная по напряжениям	$\sigma_0^{(1,0)}$	МПа	1,3	0,05
Коэффициент фотоупругости	$C$	$\text{см}^2\text{Н}^{-1}$	—	$23,5 \cdot 10^{-6}$

Объемные модели (рис. 1) изготавливали с применением механической обработки в масштабе натуры ( $\alpha = 1$ ). Модели корпусных элементов (угольников) полностью воспроизводили конструкцию исследуемой детали, модели базовых элементов выполнялись как фрагменты плит. Крепежные элементы соединения (клиновые сухари, болты и гайки) изготавливали из алюминиевого сплава Д16Т. Размеры моделей и крепежных элементов, а также условия нагружения соединений приняты по ранее установленным параметрам для элементов УСРПС серии I.

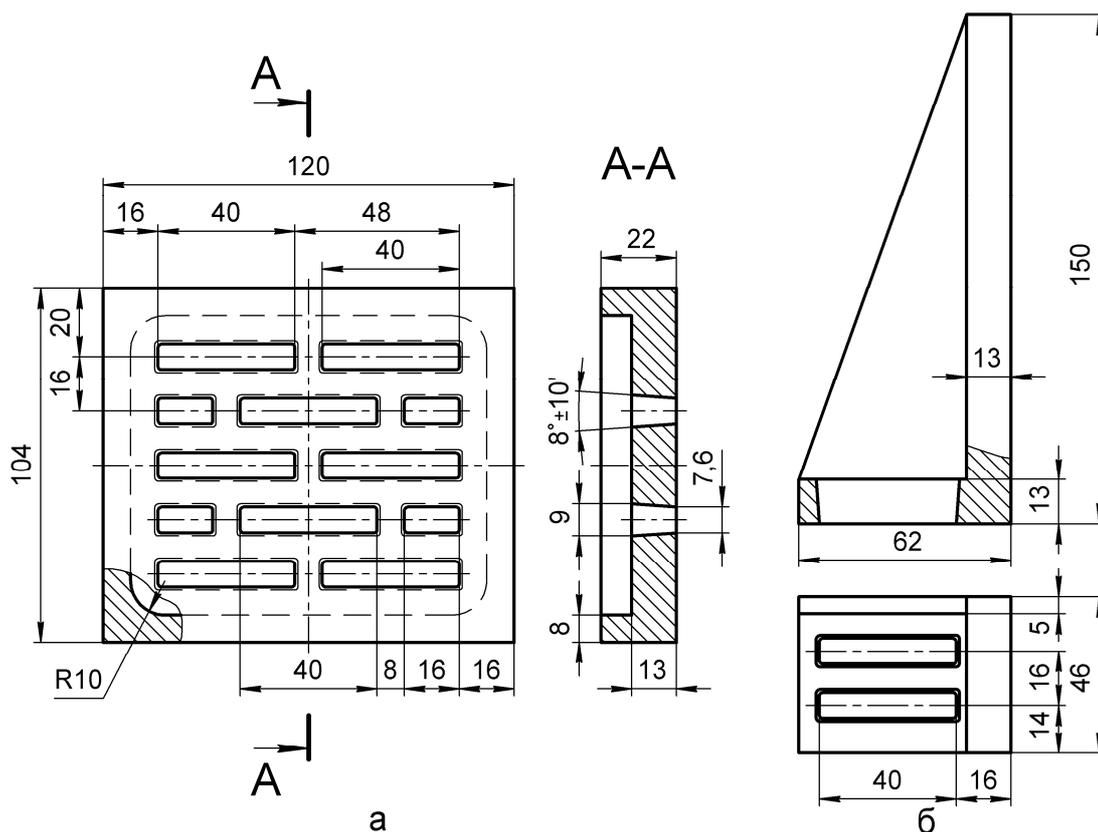


Рис. 1. Объемные оптические модели: а – базовой плиты; б – угольника

Исследуемые соединения выполнялись по двум схемам расположения наборов крепежных элементов (рис. 2):

а – наборы крепежных элементов размещены в одной плоскости, проходящей через середину длинных сторон угольника, когда создаются максимальные нагрузки на перемычки пазов;

б – наборы крепежных элементов расположены в разных плоскостях в наиболее неблагоприятном сочетании, когда сдвигающе-опрокидывающее усилие  $P_{пр}$  создает максимальные нагрузки на соединение.

Каждое соединение, собранное по схемам «а» или «б», испытывалось по двум вариантам нагружения:

1) при действии на соединение только усилия затяжки резьбовых крепежных элементов  $Q = 3$  кН;

2) при совместном действии на соединение усилия затяжки  $Q = 3$  кН и сдвигающе-опрокидывающего усилия  $P_{пр} = 2,3$  кН.

Величины нагрузок  $Q_M$  и  $P_M$ , прилагаемые к моделям в ходе экспериментов, установлены из условий моделирования по формулам:

$$Q_M = \frac{Q_H}{\beta}, \tag{1}$$

$$P_M = \frac{P_{пр}}{\beta}, \tag{2}$$

где  $Q_M, Q_H, P_M, P_{пр}$  – величины нагрузок соответственно для модели и натуре, кН;  
 $\beta$  – коэффициент силового подобия модели и натуре.

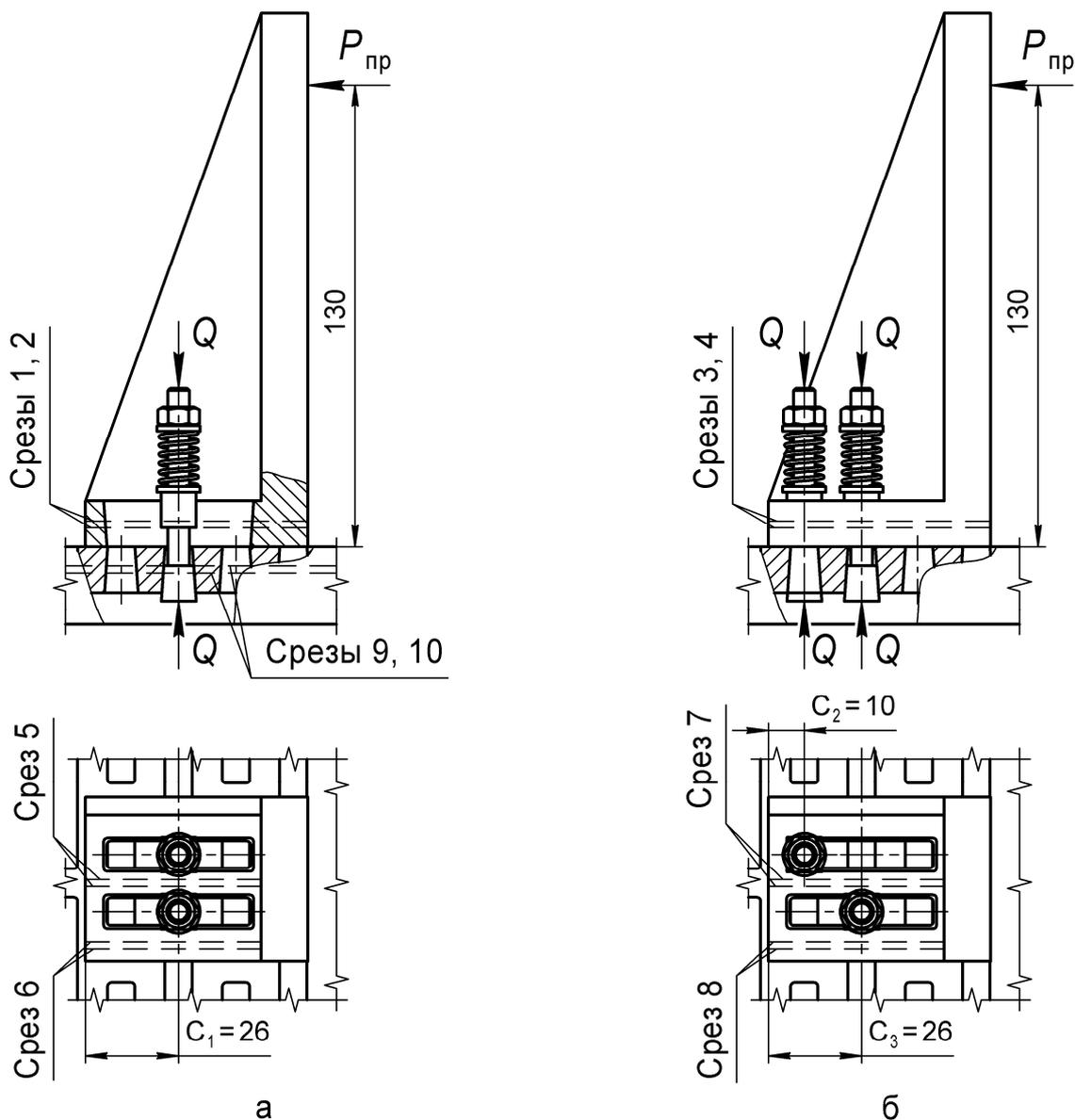


Рис. 2. Схемы испытываемых соединений

Коэффициент силового подобия модели и натуре установлен, исходя из условия равенства их относительных деформаций, наиболее полно удовлетворяющего требованиям рассматриваемого случая, по формуле, табулированной в работе [5]:

$$\beta = \alpha^2 \frac{E_H}{E_M}, \quad (3)$$

где  $\alpha = 1$  – коэффициент геометрического подобия модели и натуре;

$E_H, E_M$  – модули упругости материала натуре и модели соответственно.

Рассчитанные по формулам (1–3) нагрузки составили:  $Q_M = 0,004$  кН;  $P_M = 0,0031$  кН. Учитывая незначительные величины полученных нагрузок, передача их на модели производилась тарированными пружинами. Общий вид модели соединения с нагрузочными устройствами показан на рис. 3.

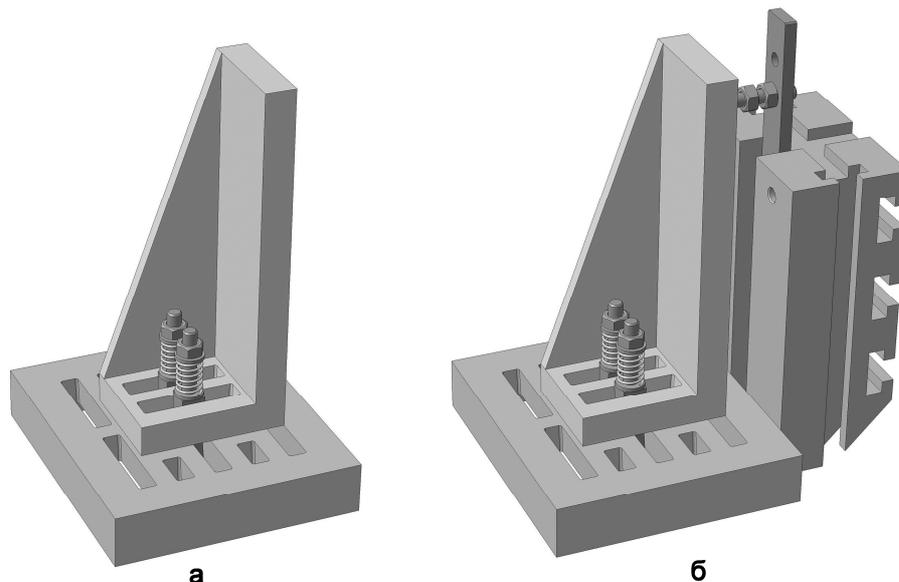


Рис. 3. Общий вид модели соединения с нагрузочными устройствами:  
 а – нагрузка соединения только усилием затяжки резьбовых крепежных элементов; б – нагрузка соединения усилием затяжки и сдвигающе-опрокидывающим усилием, прилагаемым к угольнику

«Замораживание» моделей производили в термостате в следующем порядке:

- модель соединения с нагрузочным устройством устанавливали в термостат и нагревали до температуры 413 К в течение 24 часов;
- нагретую до температуры 413 К модель выдерживали в термостате в течение 2 часов;
- модель нагружали и под нагрузкой выдерживали еще в течение 2 часов;
- оставляя модель под нагрузкой, понижали ее температуру до уровня комнатной в течение 24 часов.

После «замораживания» модели размечали и разрезали на пластинки-срезы толщиной 4 мм, которые затем шлифовали до толщины 2 мм с последующим полированием до необходимой прозрачности. Чтобы устранить влияние крайних волокон на оптический эффект, пластинки-срезы вырезали из срединных плоскостей, как показано на рис. 2 пунктирными линиями (цифрами 1–10 обозначены порядковые номера срезов).

Измерение напряжений в пластинках-срезах выполняли в плоском поле координатно-синхронного поляриметра модели КСП-5 методом компенсации при помощи поворотного кальцитового компенсатора КПК.

Численную величину главного нормального напряжения на свободном контуре исследуемого элемента определяли, исходя из основного закона фотоупругости [5, 6] по формуле

$$\sigma_M = \frac{\gamma}{Ct}, \text{ МПа} \tag{4}$$

где  $\gamma$  – разность хода лучей по компенсатору, см;

$C$  – коэффициент фотоупругости материала модели,  $\text{см}^2\text{Н}^{-1}$ ;

$t$  – толщина пластины-среза, см.

Переход от напряжений в модели к напряжениям в натуре производили в соответствии с принятым условием силового подобия по формуле:

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{м}} \frac{\beta}{\alpha^2}, \text{ МПа.} \quad (5)$$

На рис. 4 приведены наиболее характерные картины полос и кривые распределения напряжений по внутреннему контуру пазов и наружному контуру опорного основания угольника при различных вариантах установки соединительных элементов и совместном нагружении их усилиями  $Q$  и  $P_{\text{пр}}$ . Общим для всех вариантов является наличие большого числа изотропных (нулевых) точек, в связи с чем кривые контурных напряжений постоянно меняют знак. Наибольшие растягивающие напряжения по контуру пазов возникают в их углах. По наружному контуру опорного основания наибольшие растягивающие напряжения образуются от изгиба крайней, менее жесткой перемычки. При установке в соединении элементов по схеме «б» контурные напряжения на 12...23 % ниже, чем при установке и соединении элементов по схеме «а».

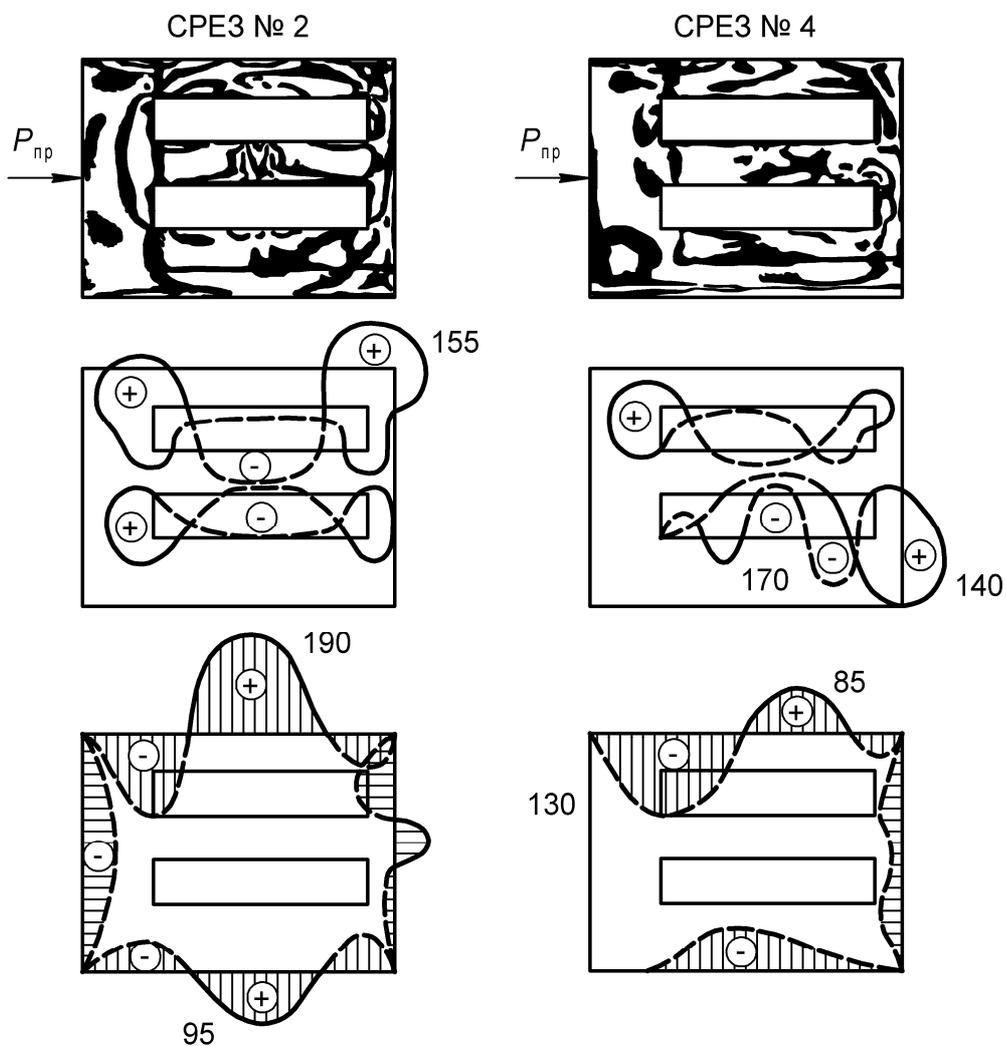


Рис. 4. Картины полос и эпюры напряжений в срезах 2 и 4 угольника при нагружении соединения усилиями  $Q$  и  $P_{\text{пр}}$

При одновременном действии на соединение усилия затяжки резьбовых крепежных элементов  $Q$  и сдвигающе-опрокидывающего усилия  $P_{пр}$  действующие напряжения увеличиваются на 15...20 %, что вызвано ростом бокового давления  $T$  от дополнительного осевого усилия  $R = 130P_{пр}/C_{1,2}$ , возникающего в соединении. Наибольших значений главные контурные напряжения достигают в углах пазов  $\sigma_1 = 155$  МПа и в середине пролета крайней перемычки паза  $\sigma_2 = 190$  МПа, что вполне удовлетворяет условию прочности —  $\sigma_{1,2} \leq [\sigma]$ .

На рис. 5 построены кривые распределения нормальных напряжений по продольному контуру балочных элементов опорного основания угольника, определенные из вертикальных срезов 5–8 (см. рис. 2) при одновременном действии на соединение усилий  $Q$  и  $P_{пр}$ . При действии на соединение только усилия затяжки резьбовых элементов  $Q$  изгиб опорного основания в вертикальной плоскости отсутствует, и напряжения в срезах 5–8 не возникают. Как видно из эпюр контурных напряжений, их распределение соответствует изгибу балочных элементов и для всех срезов аналогично. Смещаются только максимумы напряжений в зависимости от схемы установки соединительных элементов. Наибольшие растягивающие напряжения составляют 110 МПа, что значительно ниже показателей  $[\sigma]$ .

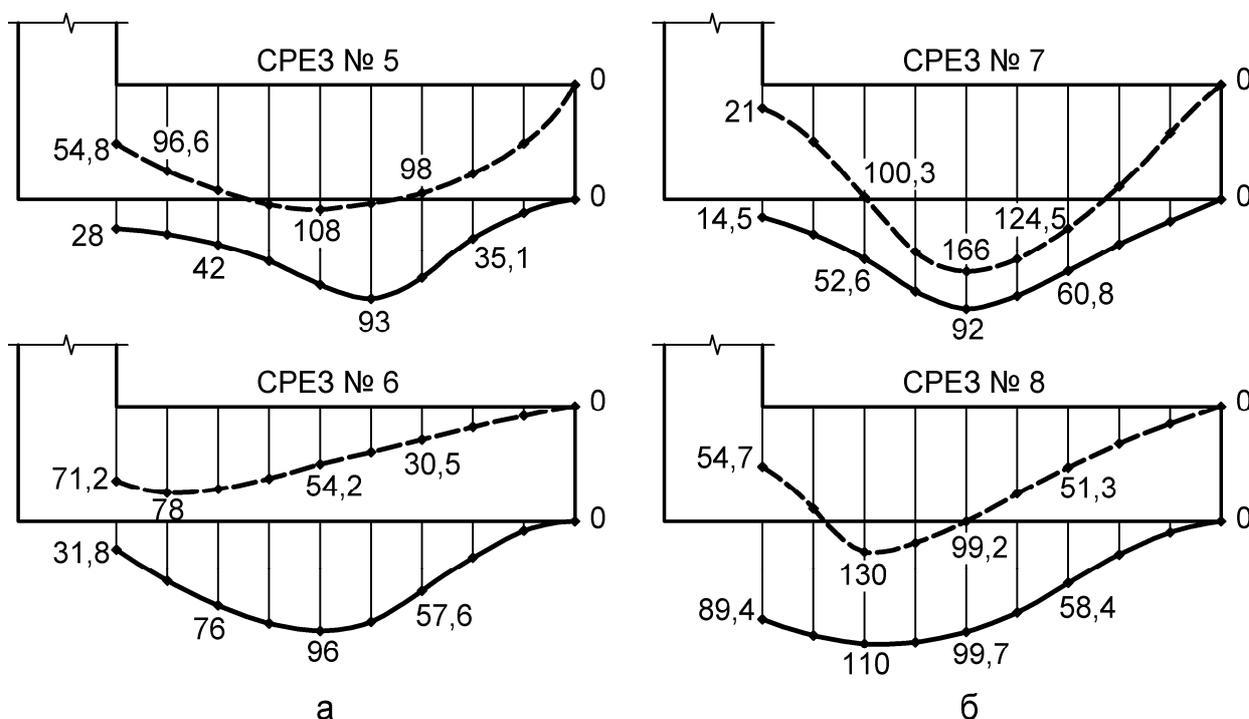


Рис. 5. Эпюры напряжений в срезах 5–8 угольника при совместном действии на соединение усилий  $Q$  и  $P_{пр}$ : а – соединение элементов по схеме «а»; б – то же, по схеме «б»

Срезы 9 и 10, расположенные в срединной плоскости базовой плиты, исследовали при установке соединительных элементов по схеме «а».

Схема «б» не вызывает сомнений с позиции прочности, так как боковое давление  $T$  на стенки паза воспринимается перемычками пазов и изгиба балочных элементов не происходит. Как видно из кривых распределения контурных напряжений (рис. 6), зонами концентрации их являются углы пазов в районе действия бокового давления  $T$ , где значения растягивающих напряжений достигают

145 МПа. При действии на соединение только усилия  $Q$  контурные напряжения снижаются на 10...12 %.

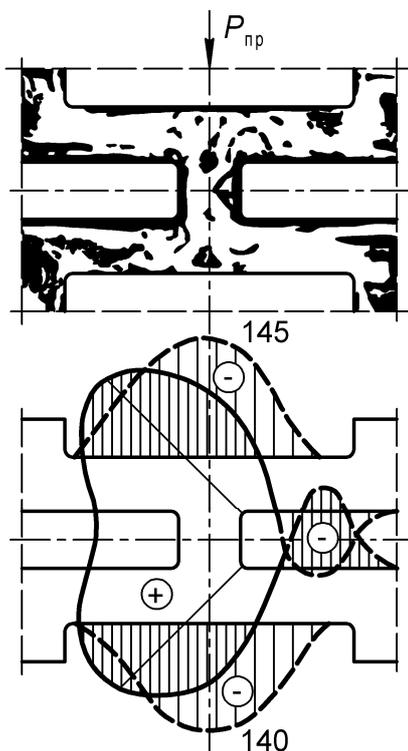


Рис. 6. Картины полос и эпюры напряжений в срезах 10 моделей базовых плит

### Вывод

Проведенные исследования напряженного состояния в соединении базовых и корпусных элементов УСРПС позволили получить реальную картину распределения напряжений и установить их экспериментальные параметры, которые оказались значительно ниже показателей  $[\sigma]$ , что дает уверенную гарантию прочности предложенных элементов в соединении базовых и корпусных деталей УСРПС.

### Список литературы

1. Филатов Л.С. Система переналаживаемой технологической оснастки для сборочно-сварочного производства отрасли [Текст] / Л.С. Филатов // Прогрессивные виды универсально-сборной переналаживаемой оснастки: тез. докл. II отраслевой конф. – М., 1987. – С. 20-25.
2. Ряховский А.В. Состояние, перспективы и концепция развития переналаживаемой оснастки для гибких производственных систем [Текст] / А.В. Ряховский // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. – 1999. – С. 28-34.
3. Фролов Е.А. Критерии оценки конструктивных и силовых параметров универсальных сварочных сборно-разборных приспособлений [Текст] / Е.А. Фролов, О.В. Бондарь, С.И. Кравченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 26-31.

4. Мовшович А.Я. Конструкции универсально-сборных приспособлений для сборочно-сварочных работ [Текст] / А.Я. Мовшович, К.А. Изотова, Ю.А. Черная, О.В. Бондарь // Машиностроение: сб. науч. тр. Укр. инженерно-пед. акад. – № 9. – X., 2012. – С. 148-161.

5. Чиченев Н.А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением (экспериментальная механика) [Текст] / Н.А. Чиченев, А.Б. Кудрин, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 312 с.

6. Хаберланд Г. Обработка данных фотоупругого исследования пластин с учетом теории Рейнера. Поляризационно-оптический метод исследований напряжений [Текст] / Г. Хаберланд. – Л.: ЛГУ, 1966. – 776 с.

Поступила в редакцию 11.09.2015.

### **Експериментальне дослідження напруженого стану в з'єднанні базових і корпусних деталей оборотного збірно-зварювального оснащення**

У статті представлені результати експериментальних досліджень по визначенню напружень, що діють у небезпечних перерізах елементів з'єднання, виявлення загальних картин їх розподілу та схем роботи окремих елементів базових і корпусних деталей універсальних збірно-розбірних пристосувань для проведення зварних робіт з метою оцінки їх міцності. Отримано за допомогою поляризаційно-оптичного методу досліджень реальну картину розподілу напружень у з'єднаннях базових елементів пристосувань, що виявилися нижчими за показники допустимих напружень.

**Ключові слова:** збірно-розбірні пристосування, складання, зварювання, напруження, об'ємні моделі, поляризаційно-оптичний метод, клинове з'єднання.

### **Experimental investigation of a tension in connection of basic and case details of reversible assembly and welding equipment**

The article presents the results of experimental studies on determination of tension in the dangerous section of the connection, the identification of common paintings of their distribution and schemes of work of separate elements of basic and case details of universal collapsible adaptations for carrying out welding works for the purpose of an assessment of their durability. The real picture of distribution of tension in connections of basic elements of adaptations which appeared below indicators of admissible tension is received by means of a polarizing and optical method of researches.

**Keywords:** collapsible adaptations, assembly, welding, tension, volume models, polarizing and optical method, maple connection.