

Министерство науки, высшего образования  
и технической политики РСФСР

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ  
И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ  
СВАРНЫХ ОДНОТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ

Методические указания  
к лабораторной работе 04.50

Самара 1992

Составители: П.А.Б о р д а к о в,  
М.Д.Р у д м а н

УДК 621.791.763:539.4

Исследование влияния условий нагружения на прочность и характер разрушения сварных односторонних соединений сталей: Метод. указания к лаборатор. работе 04.50 /Сост. П.А.Б о р д а к о в, М.Д.Р у д м а н. Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992. 16 с.

Даны краткие теоретические основы экспериментов, изложены требования к последовательности их выполнения и оформлению отчета.

Рекомендованы кафедрой производства летательных аппаратов для студентов I, 2 и 3 факультетов, специализирующихся в области проектирования, эксплуатации и расчета на прочность конструкций ЛА и их двигателей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензент А.И.Н а у м о в

Ц е л ь р а б о т ы: практическое ознакомление с методиками статических механических испытаний сварных одноточечных соединений и установления критериев их пластичности.

### ОБЪЕМ СВЕДЕНИЯ

Специфической особенностью конструкции самолетов является большое количество соединяемых элементов (деталей, узлов, подборок), а значит, и большое количество соединительных элементов. В конструкциях из алюминиевых сплавов подавляющее большинство соединений (около 95%) — так называемые "точечные" (заклепки, винты, болты, сварные точки) и лишь около 5% — "сплошные", выполненные пайкой, склеиванием, способами сварки плавлением. Около 60% "точечных" соединений — поддерживающие (связывающие), т.е. предназначенные для соединения совместно работающих деталей без передачи основной части потока сил, проходящих через них [1]. Типичный представитель — обшивка со стрингерным набором.

В конструкции планера самолета Ан-22, например, более 2 млн "точечных" соединений, в том числе около 380 тыс. (17%) сварных точек; во втором отсеке фюзеляжа таких соединений более 30%.

Соединения, выполненные контактной точечной сваркой, по ряду конструктивно-технологических показателей могут успешно конкурировать с заклепочными. По массе соединений, статической и усталостной прочности, гладкости поверхности, стоимости производства работ, возможности механизации и автоматизации производственных процессов точечные соединения не уступают заклепочным, а по герметичности — значительно их превосходят.

Недостатком сварных точечных соединений является их высокая жесткость, что препятствует перераспределению нагрузок между отдельными соединениями, а для соединений из низкокоррозионных — вих алюминевых сплавов — необходимость удаления защитных покрытий на деталях в местах их сварки и антикоррозионной обработки узлов после сварки. Эти недостатки частично устраняются (при повышении трудоемкости и массы конструкции) путем применения точечных клееварных соединений. Отметим, что при этом существенно повышается усталостная прочность соединений. Точечные клееварные соединения широко применяются в конструкциях самолетов Ан-24 (более 80 тыс. соединений), Пе-30 (более 40 тыс.), Як-40 (более 33 тыс.), Як-12 (26 клееварных панелей фюзеляжа), ракетносителя "Центавр".

Величина шага между сварными точками поддегисварных соединений устанавливается из условия предотвращения потери устойчивости соединяемых элементов и с уменьшением их толщины уменьшается [ 2, табл. I ].

Так как при переходе с алюминиевых сплавов на более прочные стали и титановые сплавы толщины соединяемых элементов конструкции существенно уменьшаются, то количество сварных точек должно значительно возрасти (примерно в 100-200 раз!) из-за уменьшения шага между ними и увеличения количества элементов каркаса. В таких конструкциях "точечные" соединения заменяются "слизешками", выполняемыми контактной шовной сваркой или сваркой плавлением [ I ].

Более 20% от общей длины швов в конструкциях газотурбинных двигателей из сталей и титановых сплавов выполнены контактной точечной и шовной сваркой; цельносварными являются панели звукопоглощающих конструкций двигателей — сотенки или гофры; толщина сот-гофры — от 0,04 до 1,0 мм, толщина листов обшивки — от 0,2 до 1,2 мм.

Следует напомнить, что контактная точечная и шовная сварка были впервые применены еще в 30-е годы в конструкциях самолетов А.М.Вутилова и Р.Л.Бартини "Сталь" и "Сталь-МАИ". В это же время была впервые осуществлена точечная сварка хромангния с гальванической обработкой каждой точки между электродами сварочной машины (Н.В.Гевалдинг, Н.И.Слесарев, П.А.Епишев).

В данной работе используются результаты, полученные при исследовании влияния параметров режима на прочность соединений [2] и практического освоения методики математического планирования экспериментов [9].

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим методику расчета на прочность нахлесточного соединения с односторонним точечным швом (рис. 1, а), статически нагруженного в плоскости прилегания свариваемых деталей усилием  $P_x$  на одну точку (рис. 1, б) [3].

Значение  $P_x$  определяется через напряжения на периферии соединяемых деталей  $\sigma_{xxj}$ , толщину деталей  $s_j$  и шаг  $t$  между сварными точками:

$$P_x = \sigma_{xxj} s_j t \quad (j=1,2).$$

При испытании путем растяжения одноточечного образца типа XX по ГОСТ 6996-66 (рис. 2, [2]) зона сварной точки диаметром  $2R$  поворачивается на угол  $\beta$  и смещается от линии действия силы  $P_x$  на величину  $\Delta$  (рис. 1, в, д).

В результате нагружения на сварную точку действуют срезывающие усилия  $P_x' = P_x \cos \beta$ , отрывное усилие  $P_x'' = P_x \sin \beta$  и момент  $M = M_1^0 + M_2^0 = P_x \frac{s_1 + s_2}{2} \cos \beta$  (рис. 1, в, г, д).

Изгиб каждого из соединяемых элементов  $u_j(x_j)$  определяется решением краевой задачи:

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2} (E'I)_j = -M_j^0 + P_x (u_j - u_{j0}), \quad (I)$$

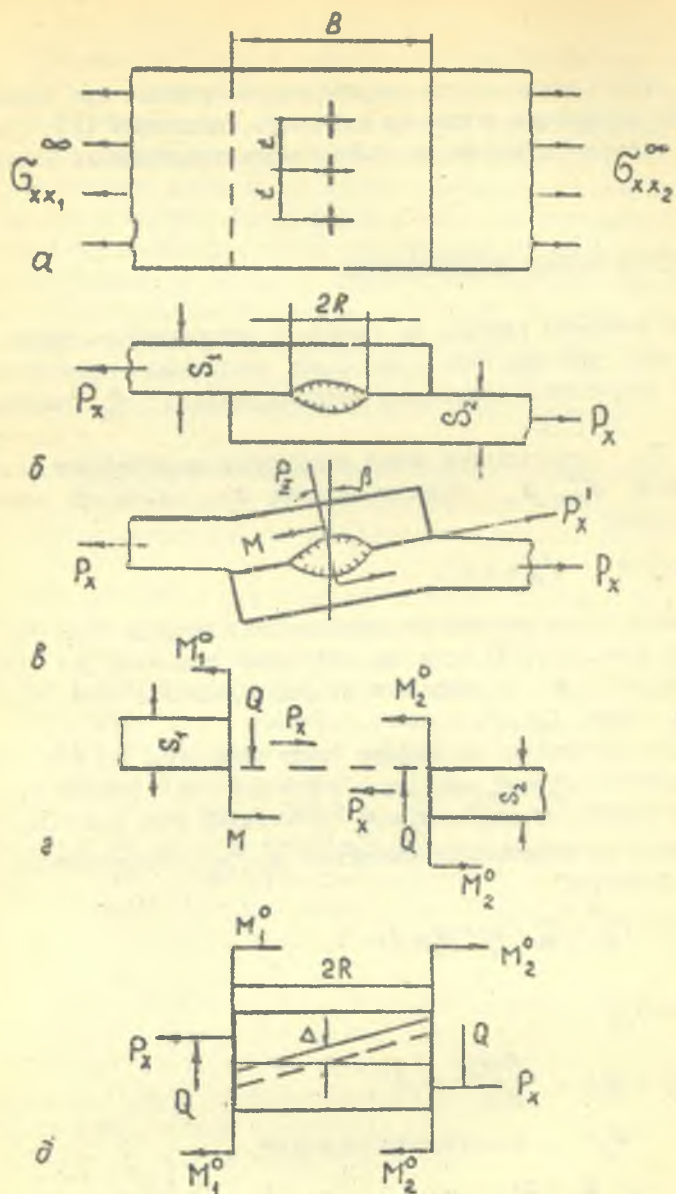
$$0 < x < \infty, \quad j=1,2$$

$$\text{при } x_j = 0 \quad u_j = u_{j0}, \quad \frac{\partial u_j}{\partial x} = \beta$$

$$\text{при } x_j \rightarrow \infty \quad u_j - \text{ограниченная величина,}$$

$$\text{где } M_1^0 + M_2^0 = P_x \frac{s_1 + s_2}{2} - Q 2R; \quad Q = P_x \beta; \quad I_j = \frac{s_j^3 t}{12};$$





Р и с. 1. Схема нагружения накладного соединения с одним точечным изломом [3]

секундный модуль  $E'$  при упругом деформировании материалов равен модулю Кнута  $G_j$  ( $j = 1, 2$ ).

При развитии пластического течения, характерном для предельного состояния вязкого материала, в случае статического нагружения принимают

$$E' = \frac{S_x - \sigma_p}{\ln \frac{1}{1-\psi}}$$

Здесь  $S_x$  - истинное сопротивление отрыву,  $\psi$  - локальное равномерное относительное сужение поперечного сечения при одноосном растяжении.

Обозначив  $m_j^2 = \frac{P_x}{(E' \cdot I)_j}$ , получим из (1)

$$u_j(x_j) = \frac{M_j^0}{P_x} + C_j e^{-m_j x_j} + u_{j0} \quad (j=1,2), \quad (2)$$

где  $C_j = -\frac{M_j^0}{P_x}$ ;  $\beta = \frac{M_1 m_1}{P_x}$

или

$$\beta = \frac{S_1 + S_2}{2 \left( \frac{l}{m_1} + \frac{l}{m_2} + 2R \right)}, \quad (3)$$

т.е. значение угла  $\beta$  лежит в пределах  $0 < \beta < \frac{S_1 + S_2}{4R}$ .

В случае разрушения точки срезом интенсивность напряжений  $\sigma'_{jcp}$ , определяющую вязкость разрушения точки, можно оценить из зависимости

$$\sigma'_{jcp} = \sqrt{\left( \frac{P_2}{\pi R^2} + \frac{3M}{4R^3} \right)^2 + 3 \left( \frac{P_x'}{\pi R^2} \right)^2} = \frac{P_x \sqrt{3}}{\pi R^2} \zeta_{cp}, \quad (4)$$

где  $\zeta_{cp} = \sqrt{\cos^2 \beta + \left[ \frac{\sin \beta}{\sqrt{3}} + \frac{\pi \sqrt{3}}{8R} (S_1 + S_2) \cos \beta \right]^2}$ .

При разрушении образцов путем вырыва из свариваемых деталей по контуру сварной точки

$$\sigma_{\text{выр}} = \sqrt{3 \left( \frac{P_2}{2\pi R s_j} + \frac{M}{4R^2 s_j} \right)^2 + \left( \frac{P'_x}{s_j t} \right)^2} = \frac{P_x \sqrt{3}}{\pi R^2} \varrho_{\text{выр}}, \quad (5)$$

где  $\varrho_{\text{выр}} = \frac{R}{2s_j} \sqrt{(\sin \beta + \frac{s_1 + s_2}{4R} \cos \beta)^2 + \left( \frac{2\pi R}{t\sqrt{3}} \cos \beta \right)^2}$ .

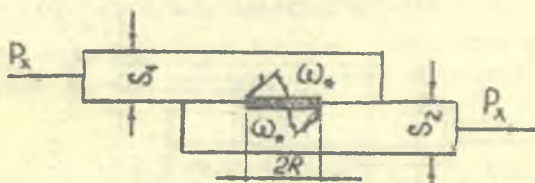
Окружность в виде ее влияния зоны термического влияния (ЗТВ), прилегающей к сварной точке, оценивается на основе критерия обобщенного нормального отрыва [4], используя следующие соотношения для коэффициентов интенсивности напряжений в зависимости от соответствующих усилий  $P_2$ ,  $P'_x$  и момента  $M$ :

$$K_I = \frac{P_2}{2R^{3/2} \sqrt{\pi}} + \frac{3M}{2R^{5/2} \sqrt{\pi}}; \quad K_{II} = \frac{P'_x}{2R^{3/2} \sqrt{\pi}}; \quad K_{III} = 0. \quad (6)$$

Направление угла вероятного развития хрупкой трещины  $\omega$  в глубь материала свариваемых деталей (рис. 2) определяется из условия

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{2} = - \frac{2\xi}{1 + \sqrt{1 + 8\xi}}, \quad (7)$$

где  $\xi = \frac{K_{II}}{K_I}$ .



Р и с. 2. Развитие хрупкой трещины вглубь свариваемого материала [3]

При  $\beta \rightarrow 0$  и  $\gamma = \frac{s_1 + s_2}{4R}$  ( $0,2 < \gamma < 0,5$ ) значение  $\omega$  изменяется в пределах  $31,3^\circ < |\omega| < 50,2^\circ$ . Увеличение угла  $\beta$  приводит к некоторому уменьшению угла  $\omega$ .



Количественное влияние ЗТВ на предельную статическую нагрузку  $P_{xnp}$  можно определить из двухпараметрического критерия:

$$\left(\frac{\sigma_j^{n'}}{\sigma_p}\right)^2 + \left(\frac{K_\omega}{K_{cjp}}\right)^2 = 1, \quad (8)$$

где  $n'$  — определяет механизм разрушения (срез или разрыв);

$$K_\omega = K_I \frac{1 + 3\sqrt{1 + 85^2}}{4} \cos^3 \frac{\omega}{2}. \quad (9)$$

Значения  $\sigma_j$  определяются из выражений (4) и (5);  $\sigma_p$  — сопротивление материала вязкому разрушению (обычно  $\sigma_B < \sigma_p < \sigma_X$ );  $K_{cjp}$  — произведение коэффициента вязкости разрушения материала  $K_{Ic}$  и поправки  $\lambda_2'$ , учитывающей малые толщины соединяемых деталей:

$$\lambda_2' = \frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \sqrt{\frac{m}{s}}; \text{ при этом } \lambda_2' \geq 1; m = 1 \dots 5.$$

Тогда

$$K_{cjp} = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \sqrt{\frac{m}{s}}\right)_j \quad (j=1,2). \quad (10)$$

Из выражений (4) и (9) можно найти численные значения предельной статической нагрузки  $(P_{xnp})^{n'}$ .

При статическом нагружении возможно и вязкое разрушение испытываемых образцов по основному материалу:

$$P_{xnp} = (\sigma_p s)_j t \quad (j=1,2) \quad (11)$$

и в зоне термического влияния

$$P_{xnp} = (\sigma_{p,tvb} s)_j t \gamma_j', \quad (12)$$

где с помощью коэффициента  $\gamma_j'$  учитываются изгибные напряжения в ЗТВ, обусловленные моментами  $M_j^0$ :

$$\gamma_j' = \frac{1}{1 + 4 \frac{M_j^0}{P_{xj} s_j}} = \frac{1}{1 + \frac{\beta}{m_j s_j}}. \quad (13)$$

По ГОСТ 6396-66 разрушающая нагрузка (в ньютонах) на точку сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой, определяется испытанием на "срез" путем растяжения образца типа XX [2, рис. 2.] и на "отрыв" путем растяжения образца типа XXI [2, рис. 3].

Как правило, разрушающая нагрузка при испытании на "отрыв" меньше, чем при испытании на "срез", а их отношение  $K$  для термически упрочняющихся в процессе сварки материалов лежит в пределах 0,25, для неупрочняющихся - в пределах 0,4-0,9. Отношение  $K$  может служить характеристикой пластичности сварных соединений, способности к перераспределению нагрузки между ними.

Практическое использование критерия  $K$ , однако, затруднительно. Как было показано выше, разрушающее усилие при испытаниях на "срез" зависит от многих факторов, непосредственно с пластическими свойствами свариваемых деталей не связанных (например, толщиной образцов, диаметром сварной точки), кроме того, для испытаний на "отрыв" необходимы образцы другого типа.

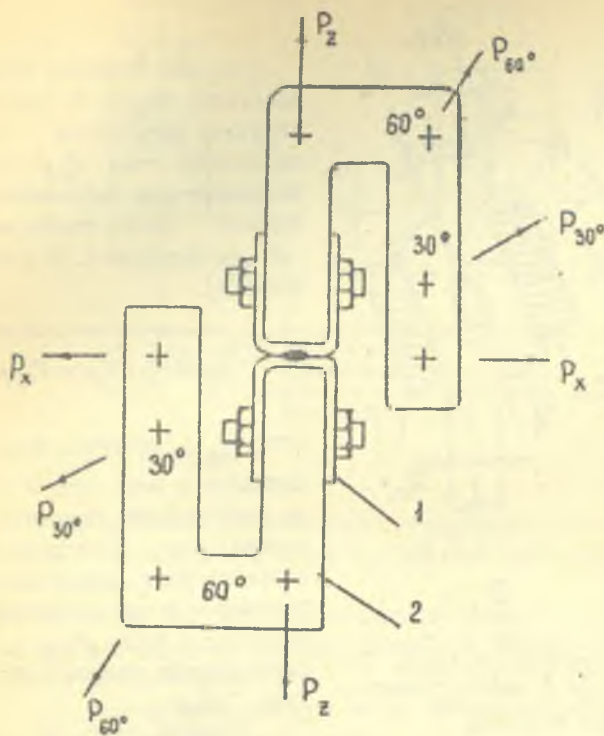
Для испытаний соединений деталей малых толщин на "срез" и "отрыв", а также под различными углами к поверхности нахлестки могут быть использованы образцы по рис. 3.

По данным работ [6, 7] хорошие результаты при оценке пластичности сварных соединений дает сопоставление разрушающих нагрузок  $P_x$  при испытаниях на "срез" стандартных образцов и  $P_{x \text{ с.о}}$  образцов, в которых исключается возникновение отрывающих сварное соединение усилий (рис. 4, а, б). В последнем случае при испытаниях используется скоба, фиксирующая нахлестку образцов без их обжатия (рис. 5).

Как правило,  $P_{x \text{ с.о}} > P_x$  и не зависит от сопутствующих факторов. В качестве критерия пластичности при этих испытаниях принимается величина  $\Pi$ , %:

$$\Pi = \left( \frac{P_{x \text{ с.о}}}{P_x} - 1 \right) 100.$$

Чем больше пластичность сварного соединения, тем меньше показатель  $\Pi$ . Так, для соединений из стали 30ХГСА, сваренных в замкнутом состоянии и без термической обработки,  $\Pi = 50-70\%$ , а после



Р и с. 3. Испитания сварных односторонних соединений на растяжении под различными углами: 1 - сварной образец; 2 - приспособления для испитаний

высокого отпуска между электродами сварочной машины  $\eta = 15-7\%$ ; для нержавеющей стали X18H9T, не упрочняющейся термической обработкой,  $\eta = 10-11\%$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В работе допускаются студенты, которые прошли инструктаж по технике безопасности и ответили на контрольные вопросы по подготовке к выполнению лабораторной работы.

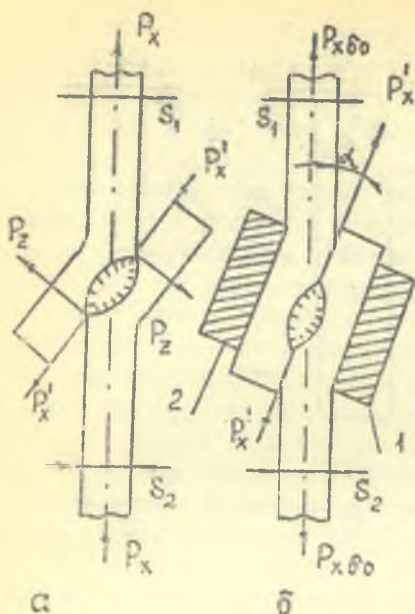


Рис. 4. Схема испытаний на "срез" растяжением стандартных образцов с зафиксированной (а) и зафиксированной (б) нахлесткой: 1 - скоба; 2 - подвижный фиксатор

Принимает по табл. 1 [2] для сварных соединений группы А, значения коэффициента  $m_z$  смотрите в [8, С. 30, 31], значения  $22g.k$  по табл. 1.2 [38], значения  $t_{сб}$  принимаются по табл. 3.6 [8].

Расчетное значение  $I_{сб}$  необходимо сравнить в табличным [8, табл. 3.6].

2. На режиме сварки, обеспечивающем образование сварных соединений заданной прочности при стандартных испытаниях на "срез" путем растяжения образца (см. рис. 4,а), установленных при выполнении работы [2 или 9], сварить образцы для испытаний по схемам, показанным на рис. 3 и рис. 4,б.

Количество образцов и схему испытаний определяет преподаватель.

3. Провести испытания указанных образцов и определить разрушающее усилие на одну точку.

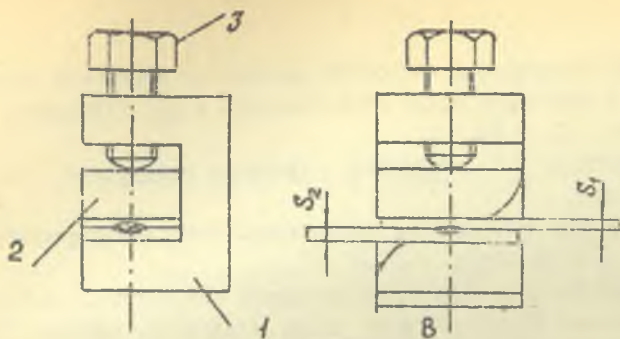
1. Для заданных преподавателем марки и толщины образцов рассчитать силу сварочного тока  $I_{сб}$ , необходимую для образования сварной точки диаметром  $d$  по формуле 1.10 учебника [8]:

$$I_{сб} = \sqrt{Q_{30} / (m_z 22g.k t_{сб})},$$

где  $Q_{30}$  - энергия, выделяющаяся в зоне сварки (между электродами сварочной машины) при электрическом сопротивлении свариваемых деталей к концу прохождения сварочного тока  $22g.k$  и длительности прохождения тока  $t_{сб}$ .

Диаметр точки  $d$  при-





Р и с. 5. Приспособление для фиксации нахлестки при испытаниях на "срез":  
 1 - скоба; 2 - подвижный фиксатор; 3 - винт;  $B$  - величина нахлестки сварного соединения

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется на отдельном бланке (см. приложение).

1. Дать эскизы использованных при испытании образцов и схему их нагружения.
2. Заполнить таблицу результатов наблюдений и вычислений.
3. Описать характер разрушения сварных соединений и дать эскизы образцов после испытаний.
4. Определить коэффициенты  $K$  и  $L$ , характеризующие пластические свойства сварных соединений.
5. Привести краткие выводы по работе, в которых сопоставить расчетные и опытные данные с нормативными [2, табл. 2] и [8, табл. 10.1]. Дать заключение о работоспособности сварных соединений при различных схемах их нагружения.

#### Библиографический список

1. Индючик С.А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов: Конспект лекций: Ч. III. М.: МАИ, 1976. 104 с.
2. Исследование влияния параметров режима контактной точечной сварки сталей на прочность соединений /Сост. М.Д.Рудман. Куйбышев. авиацион.-т. Куйбышев, 1989. 15 с.



3. Совершенствование методики расчета на прочность сварных соединений с точечными швами /В.И.Махненко и др. //Автомат. сварка. 1990. № 1. С. 9-14.

4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

5. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. Введ. с 01.01.67.

6. Новые способы оценки пластичности соединений, полученных точечной сваркой /Б.Б.Золотарев и др. //Автомат. сварка. 1980. № 2. С. 44-46.

7. А.с. 358647 СССР. Способ определения пластических свойств сварного нахлесточного соединения /Б.Б.Золотарев и др. Спубл. 1972. Бюл. № 31.

8. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для вузов /Под ред. Б.Д.Орлова. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

9. Математическое моделирование контактной точечной сварки: Метод. указания /Сост. П.А.Бордаков, М.Д.Рудман. Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Отчет по лабораторной работе 04.50

Катедра производства летательных аппаратов	Наименование лабораторной работы	Лаборатория сварки
Дата	Учебная группа	Фамилия студента

Перечень применяемых приборов и оборудования

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

Эскизы образцов с указанием марки материала и толщины до и после испытаний, схема испытаний (рис. 3, 4, а, б)

Краткие выводы по работе

Подпись студента \_\_\_\_\_

Работа зачтена \_\_\_\_\_ 199 \_\_\_\_

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Результаты наблюдений и вычисления

Считан	Расчетные данные	Фактические данные
$S_1 = S_2, M_1$		
$d_3, M$		$P_{20}^H (puc. 4a)$
$d_2, M_1$		$P_{20}^H (puc. 3)$
$L_{CB}, H$		$P_{20}^H, H (puc. 3)$
$L_{CB}, C$		$P_{50}^H, H (puc. 3)$
$F_{CM}, H$		$P_{60}^H, H (puc. 3)$
$F_{CP}, H$		$K = P_2 / P_{20}$
$L_{f, pac. 1, 2}$	$B_{20}, A_{20}$	
$B_{20}, A_{20}$	$B_{20}, A_{20}$	
$L_{20}, M, OM$	$B_2, A_2$	
	$B_1, A_1$	
	$R_2, A_{20}$	
	$R_1, A_{20}$	
	$\gamma = d_1' / d_{20}$	
		$\eta = (P_{20}^{г.о} - 1) \cdot 100\%$

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ  
НА ПРОЧНОСТЬ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ  
СВАРНЫХ ОДНОТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИИ СТАЛЕИ**

Составители: **Бордаков Павел Александрович**  
**Рудман Меер Давидович**

Редактор **Н. Д. Чайникова**  
Техн. редактор **Г. А. Усачева**  
Корректор **Н. С. Куприянова**

Подписано в печать 17.03.92. Формат 60×84 1/16.  
Бумага оберточная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,05. Уч. изд. л. 0,91.  
Тираж 100 экз. Заказ 82. Бесплатно.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Участок оперативной полиграфии  
Самарского авиационного института.  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.