



## ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

**В. А. ШОНИН, В. С. МАШИН**, кандидаты техн. наук, **О. В. ВОЙТЕНКО, В. В. НОВОЖИЛОВ**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что сглаживание поверхности металла на границах шва тавровых тонколистовых соединений алюминия и устранение угловой деформации высокочастотной проковкой обеспечивают уменьшение значений коэффициента концентрации напряжений в 1,6 раза. Проковка соединений повышает предел ограниченной выносливости на 40 % при отнулевом и на 10 % при знакопостоянном циклах напряжений.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, сварные тавровые соединения, профиль соединения, угловая остаточная деформация, концентрация напряжений, высокочастотная проковка, долговечность, сопротивление усталости

При односторонней электродуговой приварке ребер жесткости к обшивке оболочечной конструкции (тавровые сварные соединения) из алюминиевых сплавов создается значительная остаточная угловая деформация. Она образуется вследствие неравномерной усадки металла шва и обуславливает неплоскостность поверхности основного металла с лицевой стороны конструкции в зоне приварки ребра [1–3]. Под действием поперечных сил при эксплуатации угловая остаточная деформация вызывает дополнительный изгибающий момент в основном металле на границах швов, что приводит к увеличению уровня концентрации напряжений [4] и, как следствие, — к снижению сопротивления усталости сварных соединений [5, 6].

Для исправления послесварочной угловой деформации известны различные способы тепловой и холодной правки всей конструкции и отдельных ее узлов [2, 3, 5, 7]. Они основаны на применении неравномерного линейного или объемного пластического деформирования металла в плоскости изгиба. После правки образуются различные по знаку и уровню остаточные напряжения, неравномерно распределенные по толщине элемента конструкции.

Воздействие известных способов [2] концентрированного нагрева, используемого для правки толстостенных элементов конструкций путем пластического укорочения поверхностного слоя металла с выпуклой стороны, подобно неравномерному нагреву при сварке. Оно приводит к образованию растягивающих остаточных напряжений на поверхности и сжимающих напряжений в центральных слоях металла. Такая обработка способствует существенному снижению сопротивления усталости сварных соединений.

Холодные способы правки обуславливают пластическое удлинение слоя металла на вогнутой поверхности элемента конструкции с образованием сжимающих остаточных напряжений [5]. Это мо-

лотковая проковка и прокатка роликами сварного шва, приложение усилия вдоль или поперек соединения и механическое вибрирование конструктивного элемента [7]. К холодной правке можно отнести и дробеструйную обработку. Основным недостатком указанных способов холодной правки является образование высоких растягивающих остаточных напряжений в центральных слоях металла при увеличении интенсивности обработки. Кроме того, холодная правка не всегда улучшает геометрию профиля в зоне перехода от шва к основному металлу [2, 5].

В авиастроении для правки вмятин в тонкостенных элементах изделий из алюминиевых сплавов широко используют одностороннюю обработку поверхности струей стальной дроби [8, 9]. Расклепываемый поверхностный слой металла в зоне обработки действует на пластически недеформированные слои металла, расположенные ниже этого слоя, как внецентренная сила растяжения и вызывает упругую обратную деформацию — отгиб. При этом образуется система уравновешенных по толщине остаточных напряжений: сжимающие напряжения в активном наклепанном слое, напряжения растяжения в нижележащих и центральных слоях металла, а также сжимающие напряжения на поверхности элемента с его обратной стороны. Дробеструйная обработка малой интенсивности создает низкие уровни растягивающих остаточных напряжений в центральных слоях металла и способствует значительному повышению сопротивления усталости элемента в зоне исправления вмятин.

Указанных недостатков лишена высокочастотная механическая проковка тонкого поверхностного слоя металла в зоне концентратора вдоль границы шва. Она выполняется однорядной группой игольчатых бойков [10]. Благодаря проковке увеличивается радиус сопряжения поверхности шва с основным металлом, наводятся высокие сжимающие остаточные напряжения в наклепанном слое и обеспечивается существенное повышение сопротивления усталости сварных соединений при поперечном действии переменных напряжений. В случае односторонней высокочастотной проковки сварных соединений наряду с улучшением соп-

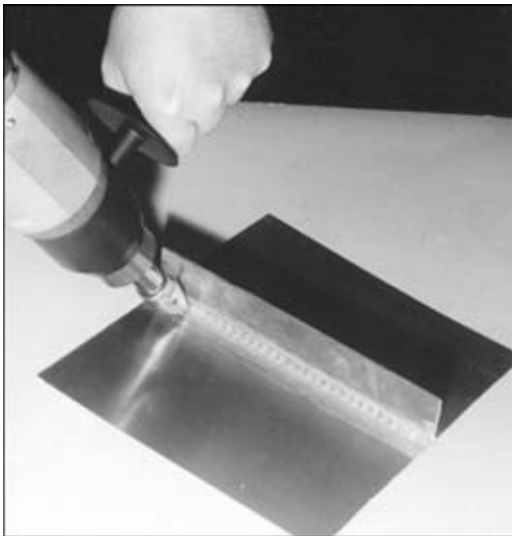


Рис. 1. Высокочастотная проковка фрагмента сварного соединения, выполняемая ручным инструментом

ряжения на границе шва может проявиться эффект отгиба плоскости сварного элемента, подобный тому, который получают при дробеструйной обработке основного металла. Это может способствовать устранению угловой остаточной деформации в тонколистовых сварных соединениях.

Цель настоящей работы — установить возможность устранения остаточной угловой деформации отгиба и повысить сопротивление усталости таврового соединения тонколистового алюминиевого сплава АМг6, сваренного плавящимся электродом в инертных газах, за счет локальной высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах шва, улучшающей геометрию сопряжения поверхностей шва и основного металла.

Для исследований применяли пластины размером 250×500×1,85 мм из сплава АМг6, в центральной части которых двумя угловыми швами приваривали ребро жесткости (500×40×1,85 мм) из этого же сплава. Импульсно-дуговую сварку сварного соединения выполняли плавящимся электродом СвАМг6 диаметром 1,6 мм в гелиево-аргоновой смеси газов на следующем режиме: сварочный ток  $I_{св} = 80...85$  А; напряжение на дуге  $U_d = 18,0...18,5$  В; скорости сварки  $v_{св} = 43...45$  м/ч; скорости подачи проволоки  $v_{п.п} = 5,9...6,0$  м/мин. Базовое значение тока  $I_6$  и значение частоты прохождения импульсов  $F_{имп}$  определяли, как

$$I_6 = I_{св} / (1,5...2,0),$$

$$F_{имп} = KI_6,$$

где  $K = 0,9...1,1$ . Содержание гелия в смеси составляло 55 об. %. Сварку заготовок таврового соединения производили в зажатом состоянии в жестком приспособлении.

Высокочастотную проковку однорядной группой бойков поверхности металла на границах швов в сварных заготовках (рис. 1) осуществляли ультразвуковым преобразователем типа «Ультрамет» мощностью 300 Вт [10]. Зависимость угла отгиба от режима и условий проковки исследовали на небольших (50×50 мм) пластинах основного металла. При этом устанавливали влияние различных

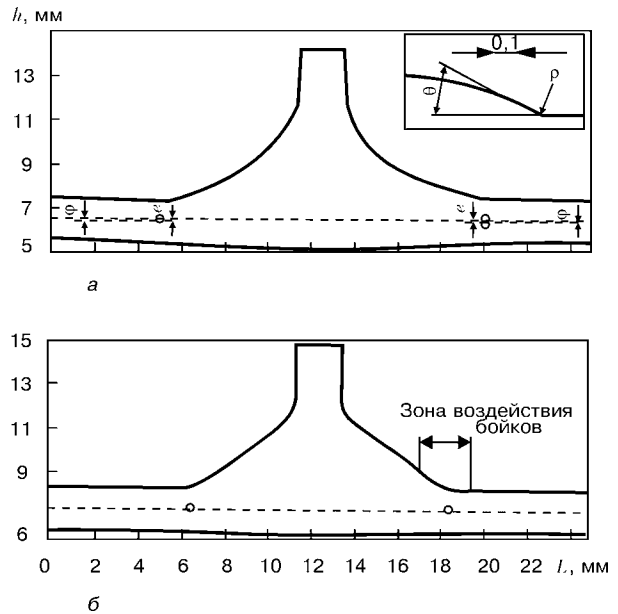


Рис. 2. Профили сварных соединений в исходном состоянии (а) и после высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах швов (б);  $h, L$  — координаты измерений; точки — проекции оси, относительно которой происходит угловая деформация

факторов на угол отгиба относительно линии односторонней проковки в середине пластины по всей ее длине. Применяли бойки диаметром 2, 3 и 5 мм. Среднюю скорость перемещения инструмента изменяли в пределах 1...5 мм/с.

Геометрию профиля соединений в сварных заготовках после сварки и высокочастотной проковки поверхности на границах швов, а также угол отгиба  $\phi'$  в малогабаритных пластинах основного металла после проковки, определяли методом профилометрии с использованием инструментального микроскопа БМИ-1. В сварных соединениях измеряли остаточную угловую (после сварки) деформацию  $\phi$ , эксцентриситет  $e$  для базового расстояния 5 мм от зоны сплавления, а также угол  $\theta$  и радиус сопряжения поверхности шва  $\rho$  с основным металлом (рис. 2, 3).

Влияние высокочастотной проковки на сопротивление усталости сварных соединений оценивали на образцах размером 50×230 мм с шириной рабочей зоны 25 мм, которые вырезали из сварной заготовки в состоянии непосредственно после сварки и высокочастотной проковки. Значения коэффициента концентрации напряжений в сварных образцах определяли с помощью известных расчетных методик [4], при этом исходили из данных измерений параметров профиля соединений. Испытания на усталость сварных образцов проводили под действием осевой циклической нагрузки при коэффициентах асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = 0$  и 0,4 и частоте 4...5 Гц с применением электрогидравлической машины УЕ-10. Долговечность при испытаниях ограничивали значением  $N = 1 \cdot 10^6$  циклов нагружений.

Измерения остаточной угловой деформации с обратной стороны исходных соединений показали, что максимальный (до 3°) угол остаточной деформации наблюдается непосредственно под свар-



ным швом в зоне наибольшей толщины наплавленного металла. На границах швов с основным металлом остаточная угловая деформация  $\varphi$  (рис. 2, а) превышала  $2^\circ$ . За пределами сварного соединения угловая деформация незначительна.

В случае сварки плавящимся электродом при расположении швов в центральной зоне поперечного соединения обеспечивался минимальный продольный остаточный прогиб основного металла под ребром жесткости. В зонах действия сжимающих сварочных остаточных напряжений по краям основной пластины вследствие потери упругой устойчивости стрела прогиба на длине 500 мм составляла 11...15 мм.

Результаты исследований влияния режимов односторонней высокочастотной проковки на изменение остаточной угловой деформации путем отгибания пластин основного металла относительно осевой линии зоны проковки показали, что угол отгиба  $\varphi'$  существенно зависит от средней скорости перемещения инструмента при проковке и толщины обрабатываемого металла (рис. 3). Максимальный (до  $5^\circ$ ) угол отгиба при толщине пластины 1,85 мм образуется при минимальной (1 мм/с) скорости проковки, с увеличением последней угол отгиба уменьшается. Диаметр бойков не оказал значительного влияния на зависимость угла отгиба пластины от средней скорости проковки (рис. 3, а).

Как видно из рис. 3, б, приведенные данные свидетельствуют о том, что при толщине обрабатываемого металла 1,0...1,2 мм обеспечивается максимальный угол отгиба. Увеличение толщины пластины до 2,5 мм и более приводит к уменьшению этого угла. В пластинах толщиной менее 1,0 мм образуется отрицательный угол отгиба, что свидетельствует о нецелесообразности применения использованных режимов проковки для исправления угловой деформации в соединениях такой толщины. Это обусловлено тем, что площадь поверхности металла, в которой происходит пластическое удлинение, с обратной стороны проковки оказывается большей, чем непосредственно в зоне ударного действия бойков.

В сварных заготовках поперечная остаточная угловая деформация устранялась только в зоне проковки на границах швов (см. рис. 2, б). Проковка проводилась бойками диаметром 2 мм при средней скорости перемещения инструмента 4...5 мм/с. Дополнительная проковка всей поверхности шва и в местах максимальной его толщины не привела к

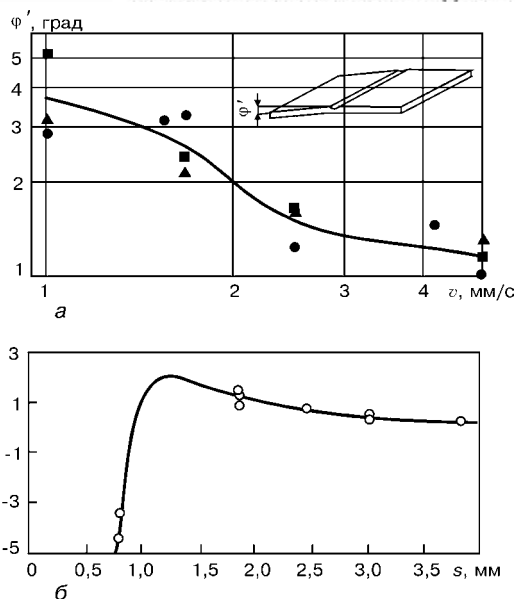


Рис. 3. Зависимость угла отгиба  $\varphi'$  пластины толщиной 1,85 мм от скорости  $v$  перемещения ручного инструмента при односторонней высокочастотной проковке бойками диаметром 2 (●), 3 (▲) и 5 (■) мм (а) и от толщины пластин  $s$  при обработке бойками диаметром 2 мм со скоростью проковки 5 мм/с (б)

заметному изменению угловой остаточной деформации поверхности с обратной стороны соединения.

От воздействия высокочастотной проковки поверхностного слоя металла на границах шва стрела прогиба по краям основной пластины уменьшилась не более чем на 25 %. Вероятно, в результате высокочастотной проковки продольная остаточная деформация сварной заготовки изменяется мало и не обеспечивает полной разгрузки продольных растягивающих остаточных напряжений, вызванных процессом сварки. При этом в прокованных соединениях в 2,6 раза увеличилось значение  $\rho$  и в 2,3 раза уменьшился угол сопряжения  $\theta$  поверхностей шва с основным металлом, а также значительно понизилась остаточная угловая деформация, что обеспечило уменьшение значения коэффициента концентрации напряжения в 1,6 раза (таблица).

Испытания на однократное статическое растяжение образцов исходных соединений и с прокованными границами швов показали, что проковка мало изменяет характер разрушения. Образцы разрушались по основному металлу за пределами сварных швов. Они имели практически одинаковые значения условного временного сопротивления —  $\sigma_B = 335...342$  МПа. Однако использование проковки привело к более раннему наступлению пласт-

**Изменения параметров геометрии профиля и концентрации напряжений в сварном тавровом соединении сплава АМг6, вызванные односторонней высокочастотной проковкой поверхностного слоя металла на границах швов**

Состояние соединения	$\theta$ , град		$\rho$ , мм		$\sigma_\alpha$		$e$ , мм		$K_e$		$\alpha_\sigma K_e$	
	$\bar{\theta}$	$S_\theta$	$\bar{\rho}$	$S_\rho$	$\bar{\sigma}_\alpha$	$S_\alpha$	$\bar{e}$	$S_e$	$\bar{K}_e$	$S_K$	$\bar{\alpha}_\sigma K_e$	$S_{\alpha K}$
Исходное	17,8	8,3	0,75	0,6	1,39	0,36	0,078	0,048	1,25	0,16	1,75	0,52
После проковки	7,9	2,4	1,97	0,6	1,07	0,02	—	—	—	—	—	—

Примечание.  $S$  — стандартные отклонения рассматриваемых параметров;  $\alpha_\sigma$  — коэффициент концентрации напряжений, обусловленный формой переходной поверхности шва к основному металлу;  $K_e$  — коэффициент концентрации напряжений, обусловленный эксцентриситетом  $e$ ; черта над символом — среднее статистическое значение параметра.

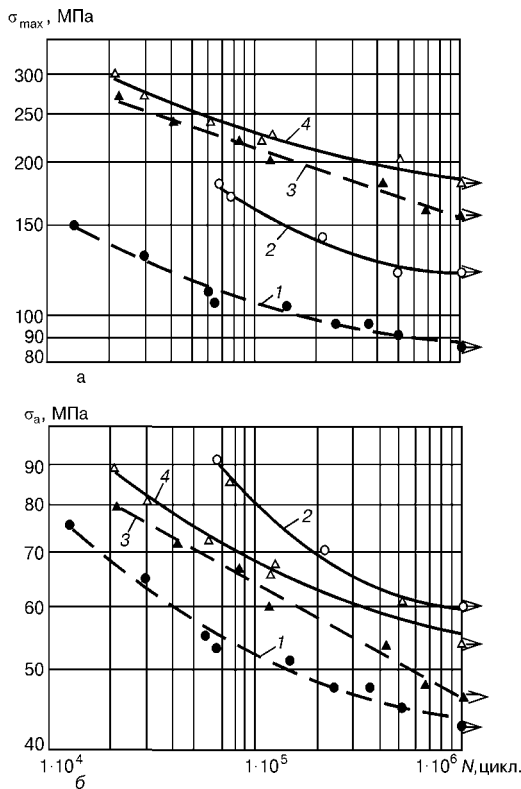


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний образцов тавровых соединений сплава АМг6 толщиной 1,85 мм, полученные при номинальном максимальном  $\sigma_{max}$  (а) и амплитудном  $\sigma_a$  (б) напряжениях: 1, 3 — после сварки; 2, 4 — после сварки и высокочастотной проковки; 1, 2 —  $R_\sigma = 0$ ; 3, 4 —  $R_\sigma = 0,4$  (точки — экспериментальные данные; точки со стрелками — разрушения образцов не происходило)

тических деформаций в соединениях, что сказалось на уменьшении условного предела упругости  $\sigma_{0,01}$  на 29 % (от 129,1 до 92,5 МПа), а условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  — на 11 % (174,4... 155,1 МПа) по сравнению с соответствующими характеристиками исходных образцов.

При циклических испытаниях усталостная трещина в исходном сварных образцах зарождалась в поверхностном слое металла на границе шва и распространялась под углом  $90^\circ$  по направлению к прикладываемой нагрузке. Такой же характер усталостного разрушения наблюдался и в образцах, имеющих прокованную поверхность. Причем усталостная трещина в них зарождалась под наклепанным слоем металла в зоне концентрации напряжений.

Односторонняя высокочастотная механическая проковка поверхности металла на границах швов существенно увеличила характеристики сопротивления усталости таврового соединения сплава АМг6 (рис. 4, а). Определено, что эффективность проковки как меры повышения сопротивления усталости соединений зависит от асимметрии внешнего напряжения. Наибольшее повышение сопротивления усталости тавровых соединений  $\sigma_{max}$  наблюдается при отнулевом цикле напряжений  $R_\sigma = 0$ . При этом долговечность соединения в результате проковки увеличивается более чем в 10 раз, а предел ограниченной выносливости при  $N = 1 \cdot 10^6$  циклах напряжения возрастает на 30%. При коэффициенте асимметрии цикла напряжений

$R_\sigma = 0,4$  наблюдается меньшее (почти в 1,5 раза) увеличение долговечности и повышение предела ограниченной выносливости приблизительно на 9%.

Уменьшение различий между долговечностью соединений в исходном состоянии и с прокованными границами швов при  $R_\sigma = 0,4$  связано с проявлением пластических деформаций, поскольку уровень действующих максимальных напряжений в соединениях превышал условный предел текучести  $\sigma_{max} > \sigma_{0,2}$ . Вероятно, это вызывает у прокованных соединений релаксацию растягивающих напряжений, уравнивающих сжимающие остаточные напряжения поверхностного наклепанного слоя металла. Вследствие этого значения вызванных проковкой сжимающих остаточных напряжений уменьшились, что стало причиной снижения долговечности образцов. В исходных же соединениях пластическое деформирование приводило к уменьшению угловой остаточной деформации и снижению концентрации напряжений на границах шва, что способствовало увеличению долговечности образцов.

Сравнение кривых усталости, представленных амплитудами напряжений (рис. 4, б), показывает, что при  $R_\sigma = 0,4$  имеет место более высокая долговечность исходных образцов и более низкая — прокованных образцов, чем в случае  $R_\sigma = 0$ . Пределы ограниченной выносливости  $\sigma_a$  при  $R_\sigma = 0,4$  снижаются до значений  $\sigma_a$  при  $R_\sigma = 0$  только в случае увеличения базовой долговечности. Прокованные соединения имеют более низкие сопротивления усталости при  $R_\sigma = 0,4$ , чем при  $R_\sigma = 0$ . При уменьшении базовой долговечности значения  $\sigma_a$  при  $R_\sigma = 0,4$  становятся существенно ниже, чем при  $R_\sigma = 0$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при перегрузке ( $\sigma_{max} > \sigma_{0,2}$ ) образцов тавровых сварных соединений с остаточной угловой деформацией в условиях циклических напряжений, превышающих предел текучести металла, обеспечивается меньшее повышение долговечности образца, чем в случае применения односторонней высокочастотной проковки в таких же условиях циклических напряжений.

## Выводы

1. Для улучшения формы профиля соединения на границах шва и устранения остаточной угловой деформации тавровых сварных соединений алюминиевых сплавов одностороннюю высокочастотную проковку целесообразно применять при толщине основного металла 1,5... 3,0 мм.

2. Установленные режимы односторонней высокочастотной проковки тавровых соединений сплава АМг6 толщиной 1,85 мм, сваренных плавающим электродом в инертных газах, обеспечивают снижение коэффициента концентрации напряжений в 1,6 раза и повышение предела ограниченной выносливости на 40% при отнулевом цикле напряжений.

3. Положительный эффект высокочастотной проковки соединений снижается при воздействии внешней нагрузки, в условиях которой номиналь-



ные максимальные напряжения в сварном соединении превышают условный предел текучести.

1. Киселев С. Н. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 176 с.
2. Трочин И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. — М.: Машгиз, 1964. — 247 с.
3. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
4. Махненко В. И., Мосенkis Р. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7-19.
5. Степанов В. Г., Клестов М. И. Поверхностное упрочнение корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1977. — 197 с.

6. Sanders W. W., Day R. H. Fatigue of aluminum alloy weldments // WRC Bulletin. — 1983. — August. — P. 21.
7. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1974. — 248 с.
8. Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В. Усталость легких конструкционных сплавов. — М.: Машиностроение, 1973. — 317 с.
9. Hertel H. Ermudungsfestigkeit der Konstruktion. — Berlin: Berlin Springer Verl., 1969. — 659 S.
10. Применение высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 7-11.

It is shown that smoothing of weld surface of thin-sheet aluminium T-joints and elimination of angular deformation by the high-frequency forging provides 1.6 times decrease in values of stress concentration coefficient. Forging of joints increases the ultimate fatigue strength by 40 % at from-zero and by 10 % at sign-constant cycles of stresses.

Поступила в редакцию 23.09.2002,  
в окончательном варианте 14.11.2002

## ВЫСТАВКА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, СТАНКО- И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ СТАНКОМАШЭКСПО

4-6 сентября 2003 г.

Одесса, Украина

Выставочный комплекс морского вокзала

### Разделы выставки:

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ**

- ✓ Тяжелое машиностроение
- ✓ Подъемно-транспортные машины и механизмы
- ✓ Транспортное машиностроение и оборудование
- ✓ Дорожно-строительные машины, спецавтотехника
- ✓ Сварочное оборудование и материалы
- ✓ Электротехнические машины и оборудование
- ✓ Металлообработка
- ✓ Металлообрабатывающее оборудование
- ✓ Инструмент и оснастка для ремонта машин и механизмов
- ✓ Технический менеджмент и материально-техническое снабжение
- ✓ Программное обеспечение в машиностроении
- ✓ Гидропневматические машины, насосы и арматура
- ✓ Смазочные материалы и технические жидкости для машин
- ✓ Антикоррозионные технологии
- ✓ Робототехника, промышленная автоматика
- ✓ Холодильные машины, компрессоры
- ✓ Подшипники, шарниры для машин и механизмов

#### **СТАНКОСТРОЕНИЕ**

- ✓ Станки, инструменты и технологии для обработки металла, дерева, камня и др. материалов
- ✓ Машины и станки для швейного и текстильного производства
- ✓ Системы ЧПУ
- ✓ Кузнечно-прессовые машины, термопластавтоматы
- ✓ Спецодежда
- ✓ Станкопринадлежности

#### **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

- ✓ Приборы и датчики измерения и контроля
- ✓ Диагностическая аппаратура
- ✓ Координатно-измерительные машины

Организатор: Центр Выставочных Технологий  
Украина, 65014, г. Одесса, пер. Сабанский, 1/10,  
Тел.+38(0482) 37-27-916 37-28-69, факс: +38(0482) 210591  
E-mail: stas@expo-odessa.com, http: \ \ www.expo-odessa.com