Учебная дисциплина «Импульсные технологии»

Раздел III. Технологическое использование конденсированных BB.

<u>Лекция 11</u>. Природа соединения, металлографические и другие способы исследования сварного шва. Физические эффекты, струе- и волнообразование, связь с прочностью соединения. Модели волнообразования. Примеры использования сварки взрывом и существующие промышленные технологии.

Металл	Толщина плевки, см	Время обра- зова- ння плен- ки, с
		1
Алюми-	12.10-8	15
Медь	3-10-7	30
Железо	2.10-7	40
Моляб-	$(2\div 3) 10^{-7}$	40
Ден	(2 + 2) 10-7	09



Рис. 2. Строение поверхности металла в воздушной атмосфере:

А — глубниный слой металла, не затронутый пластическими деформациями: Б — поверхностный слой полностью разорнентированных кристаллитов с просмойкам окислов; В — окисный слой, харантерная полярность внутренних и внешиих границ, а также полярность верхних слоен металла показаны знаками «+» и «--»; Г — адсорбированный слой кислородных анцонов и нейтральных молекул воздуха; Д — слой водяных молекул; Е — слой жировых молекул; Ж — понязированные пылерые частицы A- deep metal; **Б**- subsurface metal layer with completely disordered crystallites and oxide interlayers; **B**oxide layer (can be removed by heating in reducing atmosphere - H₂, dissociated ammonia NH₃); **Γ**- layer of adsorbed oxygen anions and neutral molecules from air; **Д**- layer of water molecules (50-100 molecules thick, can be removed by heating in vacuum); **E**- layer of grease molecules (1-5 µm after washing with benzine, benzol or any other dissolvent); **Ж**ionized dust particles.

Oxides and contamination can be removed by mechanical cleaning (sanding, brush scrubbing, grinding, etc). **But new layer appears very quickly.**

Structure of Solid Metal Surface

11

Re: Г.А. Николаев, Н.А. Ольшанский. Специальные методы сварки. -Москва: Машиностроение, 1975

Влияние поверхностных пленок

В земных условиях пленки препятствуют схватыванию металлов. Однако в космосе ситуация меняется. Проблема схватывания остро стоит в аэрокосмической технике, когда при статических нагрузках, соударениях (даже слабых) и фреттинге в условиях вакуума контактирующие металлические детали подвергаются несанкционированной холодной сварке. Ярким примером является неудача с развертыванием зонтичной антенны на космическом аппарате Galileo в 1991г, когда ее ребра местами подверглись в результате фреттинга холодной сварке при транспортировке в сложенном состоянии, и антенна не смогла полностью раскрыться

Соединение металлов в твердой фазе [8]

Явление образования соединения между двумя твердыми телами при совместной деформации называют сваркой. Для сварки в твердом состоянии употребляется также термин "адгезия", а в трибологической литературе часто вместо адгезии используется термин "схватывание".

Общий признак всех способов сварки металлов давлением – образование соединения происходит при совместной пластической деформации приконтактных объемов свариваемых металлов.

Необходимое условие: сближение свариваемых поверхностей до расстояний, когда действуют силы межатомного взаимодействия (электронный обмен между активированными атомами).

Температура в зоне шва и длительность СВ не позволяют развиться диффузионным процессам и образование соединения происходит за счет «схватывания» по контактной поверхности. Движущая сила – уменьшение свободной поверхности, т.е. уменьшение поверхностной энергии системы.

Соединение металлов в твердой фазе

Большой прогресс в понимании механизмов образования соединения достигнут еще в 60-80-е годы прошлого столетия. В частности, эксперименты на металлах с очищенными поверхностями в высоком вакууме показали, что даже при слабых сжимающих нагрузках происходит моментальное схватывание по поверхности контакта двух тел [9, 10]. Этот факт говорит о том, что основным препятствием для схватывания, по крайней мере для металлов, являются поверхностные пленки, возникающие вследствие физической и/или химической абсорбции. Было показано, что схватывание – это не диффузионное явление. Диффузионные же процессы, если они имеют место, начинаются после схватывания и, как правило, увеличивают прочность соединения [11].

Соединение металлов в твердой фазе

Сложилась точка зрения, что схватывание происходит как цепная реакция. После достижения физического контакта чистых поверхностей химическое взаимодействие происходит вначале на активных центрах (места выхода дислокаций на поверхность по [11, 12]), возникают очаги схватывания, которые затем растут и сливаются. Сам процесс образования связи рассматривается как топохимическая реакция (реакция на поверхности).

В итоге, рядом исследователей на основе экспериментальных и теоретических разработок 60 – 80-х годов была принята концепция трехстадийного протекания процесса сварки давлением [13 -15]. Это стадии: 1) образования физического контакта; 2) активации контактных поверхностей; 3) объемного взаимодействия.

В СВ стадии 1, 2 происходят практически одновременно. Стадию 3 можно интерпретировать как стадию схватывания, когда на активных центрах зарождаются очаги схватывания и затем очаги растут, пока не сольются.

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ ЧИСТЫМИ ТВЕРДЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ



Re: A.A. Shtertser. Welding Wave on the Contact Spot of Solids // Tribology International. Vol.31, No. 4, 1988. P. 169-174.

Волна схватывания [16]

При стремлении вязкости к нулю процесс протекает как адиабатический, и скорость волны схватывания стремится к предельному значению, приближающемуся к объемной скорости звука

Если вязкость *η* велика, что характерно для металлов и сплавов в твердом состоянии, то процесс протекает в изотермических условиях и скорость волны схватывания определяется по формуле

$$u_s \approx 0, 7 \cdot \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$u_s \approx \frac{40\alpha}{\eta}$$

Вязкость металлов при различных скоростях деформации

Material	Strain Rate, sec ⁻¹	Viscosity, Pa·sec
Aluminum	$ \begin{array}{c} 1\\ 10\\ 10^{3} - 10^{5}\\ \sim 10^{7} \end{array} $	$\begin{array}{r} 8.9 \cdot 10^{6} \\ 7.8 \cdot 10^{5} \\ 0.3 \cdot 10^{4} - 0.8 \cdot 10^{4} \\ 2 \cdot 10^{3} - 4 \cdot 10^{3} \end{array}$
Copper	$10 \\ 10^3 - 10^5$	$\frac{4.3 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^4 - 2.7 \cdot 10^4}$
Iron	$10 \\ 10^3 - 10^5$	$9.3 \cdot 10^{6}$ $4 \cdot 10^{4}$ - $5 \cdot 10^{4}$
Led	$ \begin{array}{c} 1 \\ 4 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^6 \\ \sim 10^7 \end{array} $	$ 5 \cdot 10^{6} \\ 3.7 \cdot 10^{4} \\ 2 \cdot 10^{3} - 4 \cdot 10^{3} $

Изменение поверхностной энергии при схватывании чистых поверхностей (данные взяты из [24]).

Пара металлов	α _{АВ} , Дж/м²
A1-A1	-2.0
A1-Cu	-2.8
A1-Fe	-3.5
AI-Ti	-3.5
Cu-Cu	-3.1
Cu-Fe	-3.3
Cu-Ti	-3.7
Fe-Fe	-4.3
Fe-Ti	-4.4
Ti-Ti	-3.5

Параметры схватывания металлов при различных скоростях деформации

Material	Strain Rate, s ⁻¹	U _s , μm/s	t, μs (for l=0.01 μm)
Aluminum	1 10	5.2 59.0	962 85
	$\frac{10^3\text{-}10^5}{\sim 10^7}$	$\begin{array}{c} \sim 8360 \\ \sim 15300 \end{array}$	$\begin{array}{c} \sim 0.6 \\ \sim 0.3 \end{array}$
Copper	$10 \\ 10^3 - 10^5$	$\frac{17}{\sim 3050}$	294 ~ 1.6
Iron	$10 \\ 10^3 - 10^5$	$\begin{array}{c} 10.7 \\ \sim 2200 \end{array}$	470 ~ 2.3
Led	$1 \\ 4 \cdot 10^5 \text{-} 8 \cdot 10^6 \\ \sim 10^7$	4.6 627 ~ 7700	$ \begin{array}{r} 1100\\ 8\\ \sim 0.65 \end{array} $



X-ray Photograph of Colliding Led Plates Re: В.М. Кудинов, А.Я. Коротеев. Сварка взрывом в металлургии. Москва: Металлургия, 1978.

Ударные волны в сварочном зазоре [4]



УВ в зазоре при движении пластины: а) две наклонные УВ; b) Маховская конфигурация. 1) фронт детонации; 2) наклонные УВ; 3) Маховская ножка, возникающая при отражении наклонной УВ от подложки; 4) Маховская ножка при отражении УВ от движущейся пластины (вторичная УВ).

М. Адамец, Б.С.Злобин, А.А. Штерцер. Ударно-волновая конфигурация в воздушном зазоре при косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва, 1991,т.27, №2, с. 128-130

Ударная волна и поток частиц в сварочном зазоре [4]



Рис.3.2.3. Выход воздушной УВ и потока частиц из зазора в конце свариваемых пластин. (а) – частицы догнали фронт УВ, сформировавшейся в зазоре; (б) – частицы опередили фронт УВ. 1фронт УВ; 2-высокоскоростные частицы. 4-кадровый регистратор SNEF-4 с электронно-оптическим преобразователем, время экспозиции 50 наносекунд

Частицы вылетают из зазора со скоростью 2,4 км/с (скорость детонации 2 км/с

М. Адамец, Б.С.Злобин, А.А. Штерцер. Ударно-волновая конфигурация в воздушном зазоре при косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва, 1991, т.27, №2, с. 128-130

Исследование зоны соединения

Важным элементом исследования процессов, происходящих при соударении пластин, является изучение зоны соединения. Для этого используются металлографические методы с применением оптической и электронной микроскопии, реперный метод, рентгеновская дифрактометрия (XRD-analysis), микрозондовый элементный анализ. Современные электронные микроскопы снабжены микрозондами. Микроскоп имеет устройство, генерирующее электронный пучок, который фокусируется в малом объеме вещества и выбивает электроны из атомов. По рентгеновским линиям определется атомный состав вещества. В ИГиЛ СО РАН имеется:

-Рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE фирмы Bruker -Сканирующий электронный микроскоп LEO 420 с энергодисперсионным спектрометром INCA



FIGURE 6. Schematical representation of the flow characteristics within the heat generating collision zone of Al3Cu / Al3Cu-claddings. Formation of the ultrafine grained zone $\{U\}$ and the zones containing elongated particles $\{E\}$. Collision of the flyer plate (a) and the backer plate (b) forming the jet (c); surface layer of oxides and adsorbed gases (d).

Flow Pattern in a Zone of Collision

Re: M. Hammerschmidt and H. Kreue. Microstructure and Bonding Mechanism in Explosive Welding // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals - Proceed. of an Int. Conf. held June 22-26, 1980 in Albuquerque, USA - Plenum Press, New York, 1981. P. 961-973.

- a flyer plate
- b base plate
- c jet formation
- d surface layer of oxides and absorbed gases
- U ultrafine grained zone

E - zone of extremely elongated particles



FIGURE 2. Representation of the bonding zone microstructure in Al3Cu / Al3Cu-claddings: schematic illustration (a), selected area TEM-micrographs and diffraction patterns from the ultrafine grained center zone {U} (b,c), within the severe deformed zone containing extremely elongated particles {E} (d,e), and from region of low deformation {D} (f,g), distance = 50 µm from the collision plane.

Aluminum alloy (3 weight % Cu) before explosive welding was heat treated to produce a grain size of several hundred mcm.

a - schematic illustration of bonding zone (U-ultrafine grained zone, E-zone of extremely elongated particles, D-zone of low deformation on the distance 50 μm from the collision plane)
b,d,f - TEM micrographs

c,e,g - diffraction patterns

Bonding Zone Al3Cu / Al3Cu

Re: M. Hammerschmidt and H. Kreue. Microstructure and Bonding Mechanism in Explosive Welding // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals - Proceed. of an Int. Conf. held June 22-26, 1980 in Albuquerque, USA - Plenum Press, New York, 1981. P. 961-973.

Локализация деформации в окрестности зоны



Картина деформации в околошовной зоне

(реперный метод)

Re: Козин Н.С., Мали В.И., Рубцов М.В. О тангенциальном разрыве при схлапывании биметаллической облицовки // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 13, № 4. С. 619-625 Re: Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980

Зона сварки взрывом. Волнообразование.



Описанием волнообразования занимались многие исследователи (Allen W., Mapes J, Wilson G., 1954; Klein W., 1965; Bahrany A.S., Crossland B., 1965; Дерибас А.А., Кудинов В.М., Матвеенков Ф.И., 1967; Гордополов Ю. А., Дремин А.Н., Михайлов А.Н., 1976; Кузьмин Г.Е., Симонов В.А., Яковлев И.В., 1976; Cowan G.R., Bergman O.R., Holtzman A.H., 1971; и др. Подробный обзор существующих концепций волнообразования представлен в [7].

Волнообразование

В ИГиЛ СО РАН экспериментально показано, что соотношение между амплитудой волн а и длиной λ лежит в диапазоне

$$0,14 \le \frac{a}{\lambda} \le 0.3$$

Кудиновым В.М., 1968 предложена формула для расчета длины волны

$$\frac{\lambda}{\delta_1} = 26\sin^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

δ1 – толщина метаемой пластины. Разброс экспериментальных точек не превышает 25 %. Обзор литературы по сварке взрывом и, в том числе, по волнообразованию представлен в [7]



Границы соединения при метании стальной пластины на плакированный медной фольгой стальной брусок

Сварка малопластичных металлов

При сварке малопластичных материалов, таких как, например, молибденовые сплавы одной из наиболее трудно решаемых задач является создание условий, при которых образование трещин на границе соединения сведено к минимуму. В настоящее время эту проблему решают с помощью нагревания материалов перед сваркой взрывом для повышения пластичности. Поскольку молибден и его сплавы при нагревании начинают активно взаимодействовать с атмосферой, нагрев таких материалов производят с применением вакуума или в атмосфере инертных газов. В конечном счете процесс сварки взрывом подобных материалов сильно усложняется.

При сварке взрывом малопластичных материалов образование трещин происходит в зоне максимальных деформаций, на гребнях и вблизи волн, образующихся на границе соединения Свести к минимуму пластические деформации можно применяя при сварке взрывом тонкие фольги в качестве промежуточных слоев

Локализация деформации в окрестности зоны сварки



0.3 mm

Прямая сварка кермета со сталью

Re: А.А. Штерцер. Взрывное компактирование порошковых материалов // Докторская диссертация, 1999

Волнообразование – молибденовые сплавы



Рисунок 3.12 Трещины на границе соединения при сварке взрывом молибденового сплава при интенсивных деформациях.

Волнообразование – молибденовые сплавы



Границы соединения при сварке взрывом молибденовых сплавов с разной степенью пластических деформаций.

Применение СВ: производство биметаллов

Основной объем приходится на пары: углеродистая сталь – нержавейка (1), сталь – титан (2), сталь – алюминий (3), сталь – медь (4).

б/м (1, 2) применяются для изготовления коррозионностойких емкостей (цистерны и др. сосуды для перевозки агрессивных жидкостей.

б/м (3) применяется для изготовления переходников (кораблестроение, алюминиевая промышленность).

б/м (4) применяют для изготовления деталей электрометаллургического оборудования и изготовления переходников между алюминиевыми и медными шинами.

СВ также применяется для решения конструкционных задач, когда надо соединить элементы конструкции и обеспечить плотность сварочного шва, чтобы не было утечек. Например, вварка труб в трубные доски (теплообменники, в т.ч. В атомной промышленности).

Компании, занимающиеся сваркой взрывом и обработкой металлов взрывом

Nobelclad (division of **NOBEL EXPLOSIFS France**, France). Dynamic Materials Corporation (former EFI- Explosive Fabricators Incorporated, now division of NOBEL EXPLOSIFS France, USA) Metal Cladding Department of Nobel's Explosives Co. Ltd. (former division of ICI, now division of NOBEL EXPLOSIFS France, Stevenston, Avrshire Scotland, GB) **Dyna Energetics** (former Dynamit Nobel, Germany) **Explomet** (Poland) Asahi Chemical Industry Co. Ltd. (Japan) E.M.S.T. LTD (Liaoning Exma Science & Technology Development CO. LTD, Shenyang, China) **EXPLOBOND** (Metal Cladding Division of IDL Chemicals Ltd., Hyderabad, India) Уралхиммаш (Екатеринбург) **TOMEKS** (Ljubija, former Yugoslavia) **SARTID** (metallurgical concern, former Yugoslavia) Энергометалл (Ст-Петербург) Битруб Интернешнл (Черноголовка) Импульсные технологии (Красноярск) **HDC** (Hindusthan Development Corporation, India) **TOMEKS** (Ljubija, former Yugoslavia) **SARTID** (metallurgical concern, former Yugoslavia) Новосибирский стрелочный завод (Новосибирск) Всероссийский институт экспериментальной физики (Саров) Byelorussian State Research-and-Production Concern of Powder Metallurgy (Minsk, Byelorussia) **Donovan Demolition Inc.** (Denvers, USA) **BOM-LTD-ROUSSE** (Rousse, Bulgaria)

Таблица свариваемости

COMMERCIAL ASSOCIATIONS OF METALS (produced by Company "Nobelclad")

		19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Carbon Steels type a, YS<350 MPa	3	1.	1	1	2	1	1	1	1	1		1	1	2	1	1	1	1	1
2	Alloy Steels or C. Steels type b, YS>350 MPa	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1		1	3	2	1	1	1	1	1
3	Stainless Steels 304, 304L, 316, 316L, 316ti, 317, 321, 347	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1		1	1	2	1	1	1	1	1
4	Ferritic Steels 405, 410S, 430	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	2	1	1	1	1	1
5	Aust. Ferritic Steels UNS 2205	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3		3	3	2	1	1	1	1	1
6	Aluminum Alloys Series 5000	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	1	1	2	2	2	2	2
7	Aluminum 1000-Al/Si Alloys	3	3	3	3	3	1	1	3	1	1		3	1	1	3	3	1	3	1
8	Brass 364, 365, 366, 464	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1		1	3	3	3	3	1	1	1
9	Al Bronze 630																			
10	Copper – CuAl 614 – CuNi 706, 715	3	3	3	1	3	3	1	3	1	1		1	1	3	3	3	1	1	1
11	Hastelloys (B2, C4)	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1		1	1	3	3	3	1	1	1
12	Nickel, Ni Alloys (UNS 04400, 06600, 06625, 08825)	3	3	3	1	3	3	1	1	1	3		3	3	3	3	3	1	1	1
13	Titanium G1, G11, G17	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1		1	1	3	1	3	1	1	1
14	Titanium G2, G7	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3		3	1	3	3	3	1	1	1
15	Titanium G12	3	3	3	3	1	3	1	3	3	3		3	3	3	3	3	2	2	2
16	Tantalum	3	1	3	1	3	3	1	1	3	1		3	3	3	3	3	1	1	1
17	Silver	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	1	1	1
18	Zirconium (low oxygen, O ₂ < 1000 ppm	3	1	3	1	3	3	1	3	3	3		3	3	3	3	3	1	1	1
19	Zirconium (standard, O ₂ > 1000 ppm)	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	3	3	3	3

 commonly produced
 commonly produced using interlayer metal (direct bonding is impossible)
 rarely produced but can be made, limited sizes, may require an interlayer and/or development

	Ag	A1	Au	Be	Cd	Co	Cz	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	РЬ	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	۷	W	Zr
Ag		C	S	×	C	D	С	C	D	×	C	D	N	C	C	D	С	D	C	D	D	X	X
A1	S		×	С	X	×	×	C	×	C	×	×	×	X	C	×	N	C	×	×	X	×	X
Au	S	×		×	×	C	D	S	С	×	×	С	N	S	×	S	N	×	N	X	D	×	X
Be	X	C	×	-	N	×	X	×	×	×	×	×	×	×	D	D	X	×	×	×	X	X	X
Cd	C	×	X	N		D	D	X	D	S	D	N	N	D	C	X	N	C	N	X	N	N	D
Co	D	×	C	X	D		C	C	С	×	С	×	×	S	C	S	S	×	×	×	X	×	X
Cz	C	X	D	×	D	C		C	С	X	С	S	×	C	C	С	S	C	X	C	D	S	X
Cu	C	C	S	X	X	C	С		С	×	S	D	D	S	C	S	D	C	D	X	D	D	X
Fe	D	×	С	X	D	C	C	C		D	С	С	X	C	C	S	×	×	X	×	C	×	X
Mg	X	C	×	×	S	×	X	×	D		X	D	N	X	×	×	N	X	N	D	N	D	D
Mn	C	X	×	×	D	С	С	S	С	×		D	×	C	C	×	N	X	X	X	X	D	X
Mo	D	X	С	×	N	X	S	D	С	D	D		S	X	D	D	X	D	S	S	S	S	X
Nb	N	×	N	×	N	×	×	D	×	N	×	S		X	N	×	X	X	D	S	S	n	S
Ni	C	×	S	X	D	S	C	S	C	×	C	X	X		C	S	D	×	X	X	X	X	X
РЪ	C	С	X	N	C	С	C	C	C	X	C	D	N	ſ	-	×	N	. C	N	X	N	n	X
Pt	S	X	S	×	X	S	C	S	S	X	×	D	X	S	X		C	×	X	X	X	×	X
Re	D	N	N	X	N	5	5	D	X	N	N	×	X	D	N	C	-	D	D	X	n	X	X
Sn	C	C	X	D	C	X	C	5	X	X	×	n	X	X	C	X	n	-	X	X	X	T	Y
Ta	D	X	N	D	N	X	X	D	X	N	X	S	n	X	N	X	n	×	-	5	n	D	Ŷ
Ti	C	X	X	×	X	X	S	×	X	D	X	S	S	X	X	Ŷ	X	Ŷ	C	5	D C	L C	-
v	D	X	D	X	N	X	n	D	S	N	X	S	5	X	N	Ŷ	n	2	n	c	2	D	2
w	n	X	N	X	N	X	D C	n	X	D	n	S	D	X	D	Ŷ	X	n	D	0	D	U	-
Zr	×	X	X	X	n	X	X	X	X	D	X	J Y	S	2	Y	~	-	U V	U V	L.	L L	~	~
[~	~	~	~	-	~	~	~	~	21	~	~	2	~	~	~	~	~	~	2	2	A	-

Рис. 35. Прогноз возможности сварки разнородных металлов по диаграммам состояния: X — свариваемые пары, образующие интерметаллические соединения, S — хорошо свариваемые пары, образующие твердые растворы, C — поддающиеся сварке пары, отличающиеся образованием сложной микроструктуры, D — данных недостаточно, для сварки необходимы особые условия, N — сведения отсутствуют Оценка свариваемости Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. – Минск: Наука и техника, 1990.

74



Токоподвод в металлургии состоит из большого количества гибких полос (Al, Cu), собранных в один пакет. С помощью CB на пакет наваривается переходный элемент для состыковки с пакетом из другого материала

1 – пакет полос; 2 – переходный элемент (соединитель);

3 – контактная поверхность переходного элемента;

 4 – гибкие металлические полосы; 5 – зона сварки полос; 6 – пластина соединительного элемента; 7 – зона сварки между полосами и пластиной соединительного элемента.

Общий вид гибкого токоподвода

Соединение токоподводов из алюминия и меди



Гибкий токоподвод (продольное сечение)

Левая шина состоит из 20 медных полос, правая – из 20 алюминиевых полос

Алюминиевые пакеты из полос, сваренные с медными пластинами



Число гибких полос 74.

Биметаллические подшипники скольжения в двигателе внутреннего сгорания



1- цилиндр и поршень,

2-коленвал,

3- маховик

В конструкцию двигателя входят коренные и шатунные вкладыши, которые работают в условиях принудительной смазки и снижают трение между шейкой коленвала и шатуном/корпусом.

Биметаллические подшипники скольжения - важные детали двигателя, влияющие на пробег между кап. ремонтами.

Производство вкладышей подшипников скольжения



Биметаллические вкладыши изготавливают разными методами, в основном прокаткой и заливкой. С 1990-х годов в России для вкладышей больших дизельных двигателей стала применяться сварка взрывом.

Заготовка вкладыша - биметаллическая пластина состоит из стальной основы и антифрикционного сплава алюминий – олово.

¹B. S. Zlobin, Commercial production of bimetal plane bearings by explosive welding in Russia, *Proceed. EXPLOMET*'95 *Intern. Conf. (El Paso, TX, August 1995)* - Elsevier Science B.V. 1995, pp. 917-921.

Конструкция метаемой пластины

Aluminum foil, t 0.15 mm



Antifriction alloy (AISn20Cu1*, AISn10Pb2 etc). *Glyco 74

Антифрикционный сплав изготавливается прокаткой и выпускается в алюминиевом чехле

Взрывная камера КВ-7

Характеристики камеры:

- масса заряда ВВ 7 кг (тротиловый эквивалент);
- масса камеры 35 т;
- габаритные размеры: длина 4640mm, ширина 2800mm, высота 4300mm (открыта);
- внутр. диаметр корпуса 2200mm;
- толщина корпуса 60mm;
- диаметр рабочего стола 1000mm.

Designed and Produced at the Design & Technology Branch of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS



Сварка биметалла

Explosive welding (cladding): steel (base) plates are placed on the worktable. Plates are made from low carbon steel sheet by cutting, milling and grinding.



Сварка биметалла

Explosive welding (cladding):
antifriction alloy plates (flyer plates) are placed over steel plates with a certain air-gap;
explosive charge is placed onto flyer plates.



Сварка биметалла

Explosive welding (cladding): bimetal plates after explosion.





После СВ, правки и мехобработки заготовка подвергается штамповке

Биметаллические заготовки вкладышей

Заготовка имеет форму полукольца. Толщина стального слоя от 3 до 20 мм, толщина антифрикционного слоя 2.0 – 2.2 мм. Диаметр полукольца от 90 до 260 мм.



Биметаллические вкладыши



Подшипник состоит из верхнего и нижнего вкладыша, которые изготавливаются из штампованных полуколец мехобработкой

Шатунные вкладыши локомотивного дизеля 5Д49

Optimal Technology and Existing Technology

Experiments show that high-quality explosive welding can be achieved at projection parameter R = 0.8 - 1.0. Antifriction layer thickness in completed bearing usually equals to 0.6 - 1.2 mm, so the flyer plate can have a thickness of 1.5 mm. Therefore in optimal technology explosive charge with a thickness of not greater than 6 mm can be used for cladding.

In existing technology ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil) explosive is used. Explosive charge thickness is 12-14 mm, flyer plate thickness is 2.2 mm. Projection parameter R = 1.5 - 1.7, and **excessive energy is driven into produced bimetal**.

Shortcomings of Existing Technology

1) Excessive energy driven into produced bimetal results in:

- excessive and non-uniform deformation of bimetal steel layer, which create difficulties when finishing mechanical treatment of workpiece is performed;

-high level of residual stresses in bimetal, which can result in loss of liner profile tolerances after manufacturing.

2) Use of 2.2 mm thick flyer plate, instead of 1.5 mm thick band, results in excessive production cost, as aluminum/tin antifriction alloy is rather expensive

To change the technology from existing to optimal one parameter R and flyer plate thickness should be reduced.

The problem: ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil) explosive has a critical layer thickness about 12 mm. To employ optimal technology another industrial explosive with lower critical layer thickness and detonation velocity D = 2 - 3 km/s should be developed.

Emulsion Explosive

Last years in Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS emulsion explosive (EE), detonating in low thickness layer with low detonation velocity was developed. Hollow glass microballoons are included in composition of this explosive with the aim to increase its detonation sensitivity. Laboratory experiments have shown that EE can be successfully employed in explosive cladding with flyer plate thickness less than 1 mm [1, 2].

EE density is 0.62 ± 0.01 g/cm³. Detonation velocity has weak dependence on layer thickness and changes from 2.3 to 2.6 km/s when thickness changes from 3.5 to 25 mm. Critical thickness of flat charge in polyethylene casing (t 0.5 mm) is less than 3.5 mm.

EE contains water solution of ammonium and sodium nitrate (oxidizer), paraffin (fuel), special emulsifying agent, and hollow glass microballoons.

EE oxygen balance is close to zero. Emulsion density is 1.41 ± 0.01 g/cm³, oxidizer drop size is not greater than 2 µm.

Microballoon average diameter is 58 μ m, green density ~ 0.15 g/cm³.

¹V. V. Sil'vestrov and A. V. Plastinin, Investigation of Low Detonation Velocity Emulsion Explosives, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, Vol. 45, No. 5, pp. 618–626

²Silvestrov V.V., Plastinin A.V., and Rafejchik S.I., Application of emulsion explosives for explosion welding, *The Paton Welding Journal*, 2009, N11, p. 61-64.

Измерения остаточной деформации

Two steel plates with a size 8 x 110 x 275 mm were clad with AlSn20Cu1 alloy using two technologies:

1) Explosive – ANFO, flyer plate thickness – 2.2 mm, R = 1.5;

2) Explosive - EE, flyer plate thickness - 1.5 mm, R = 0.8

To determine residual deformations, lines were scratched on the back surface of steel plate, and distance between scratches before and after explosive welding was measured.

Results:

Residual deformations are in 3 - 5 times greater if to use the technology (1).

Residual deformations in the center and in the edges of steel base are very different in case of technology (1), and they are almost uniform in case of technology (2).

Измерения остаточной деформации



Distribution of residual deformations, arising in the steel substrate: 1– explosive welding using ANFO, 2- explosive welding using emulsion explosive

Waves in Nature: bonding zone looks like zebra skin



Plan view of titanium / steel welding zone. Wavy interface - specific feature of explosive welding.

In conclusion a few words about Waves in Nature

What is the difference?





Zebra has a wavy drawing on skin.

Zoologists assert that zebra baby can recognize its mother by her individual skin pattern

Двумерный случай Метание пластины зарядом ВВ [1]

$$\beta = \frac{cr}{r+2.71+0.184/y} \qquad y = h/\delta_e$$

$$r = m_e/m_p$$

$$V_p = 2D\sin(\beta/2) \qquad c = \frac{\pi}{2} \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right)$$

$$\gamma = \beta + \alpha \qquad V_c = D \frac{\sin\beta}{\sin\gamma}$$

k = 2.8; 2.5; 2.2 соответственно для гексогена, аммонита 6ЖВ и смеси аммонита 6 ЖВ с аммиачной селитрой 50/50. Отсюда с = 0.71, 0.83 и 0.99 для перечисленных ВВ в том же порядке.

Двумерный случай Метание пластины зарядом ВВ

Скорость кумулятивной струи в лабораторной системе координат

$$V_{j} = \frac{V_{p}}{\sin \gamma} \left[\cos \frac{\beta}{2} + \sqrt{\cos^{2} \frac{\beta}{2} - \frac{2\sigma_{y}}{\rho V_{p}^{2}}} \right]$$

Толщина струи (компактной)

$$\frac{\delta_j}{\delta_p} = \sin^2 \frac{\gamma}{2}$$

Литература

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980.

2. Г.А. Николаев, Н.А. Ольшанский. Специальные методы сварки. - Москва:

Машиностроение, 1975

3. В.М. Кудинов, А.Я. Коротеев. Сварка взрывом в металлургии. Москва: Металлургия, 1978.

4. М. Адамец, Б.С.Злобин, А.А. Штерцер. Ударно-волновая конфигурация в воздушном зазоре при косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва, 1991, т.27, №2, с. 128-130

5. M. Hammerschmidt and H. Kreue. Microstructure and Bonding Mechanism in Explosive Welding // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals - Proceed. of an Int. Conf. held June 22-26, 1980 in Albuquerque, USA - Plenum Press, New York, 1981. P. 961-973.

6. Козин Н.С., Мали В.И., Рубцов М.В. О тангенциальном разрыве при схлапывании биметаллической облицовки // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 13, № 4. С. 619-625 7. И.В. Яковлев, В.В. Пай. Сварка металлов взрывом. Аннотированный

библиографический указатель отечественный и зарубежных работ за 50 лет. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.

8. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005

9. Gane N., Pfaelzer P.F., and Tabor D. Adhesion between clear surfaces at light loads // Proc. Roy. Soc., London, 1974. Vol. A340. P. 495-517.

10. Johnson K.I., and Keller D.V. Effect of contamination on the adhesion of metallic couples in ultra-high vacuum // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38 (4). P. 1896-1904.

Литература

11. Красулин Ю.Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. Москва: Наука, 1971

12. Шорошоров М.Х., Дрюнин С.С. Кинетика соединения материалов в твердой фазе // Физика и химия обработки материалов. 1981. №1. С.75-85.

13. Семенов А.П. Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении // Трение и износ. 1980. Т.1, № 2. С. 236-246.

14. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением – М.: Машиностроение, 1986.

15. Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1965. №1. С.29-36.

16. A.A. Shtertser. Welding Wave on the Contact Spot of Solids // Tribology International. Vol.31, No. 4, 1988. P. 169-174.

17. Oberg A., Martensson N. and Schweitz J.-A. Fundamental aspects of formation and stability of explosive welds // Metallurgical Transactions A. 1985. Vol. 16, iss. 5. P.841-852.