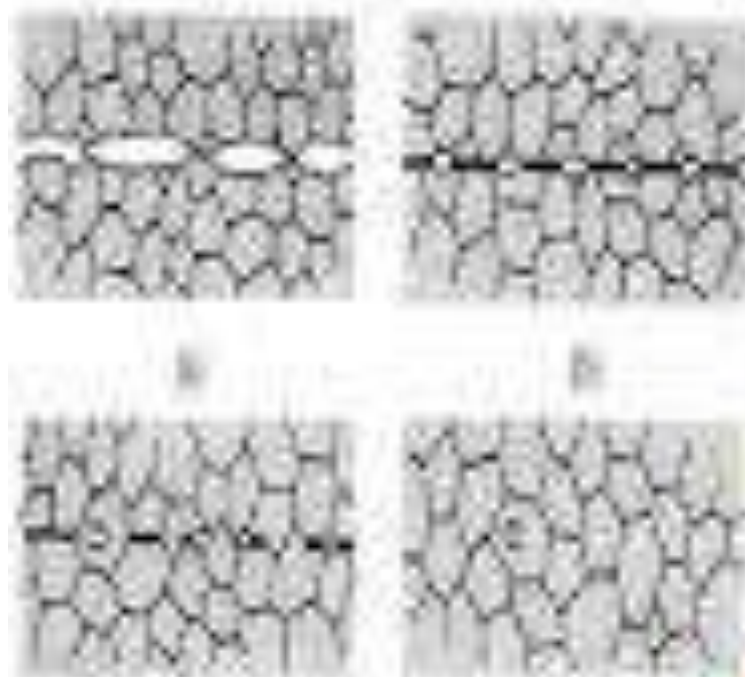


Solid State

Welding

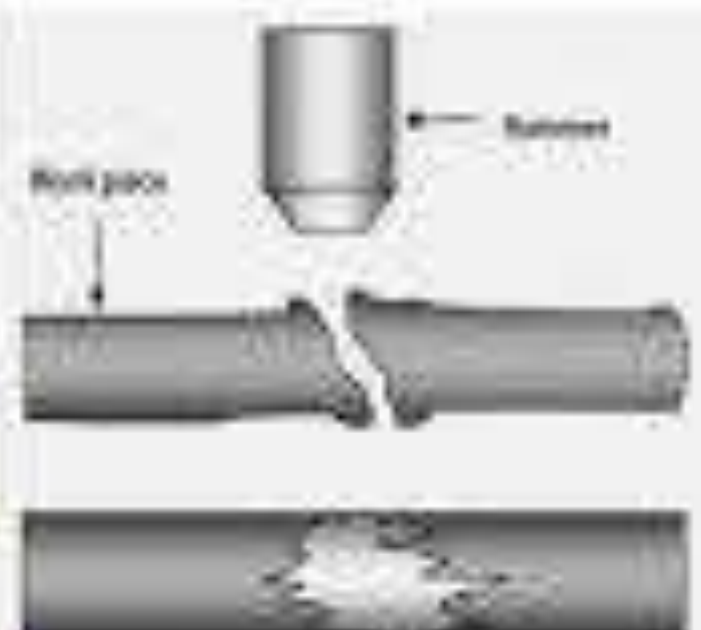


Diffusion Welding



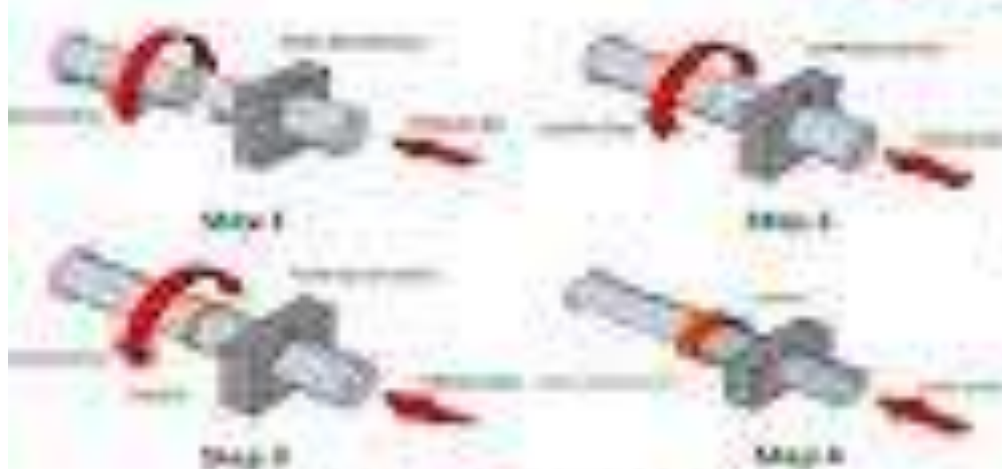
Ultrasonic Welding

SOLID STATE WELDING PROCESSES

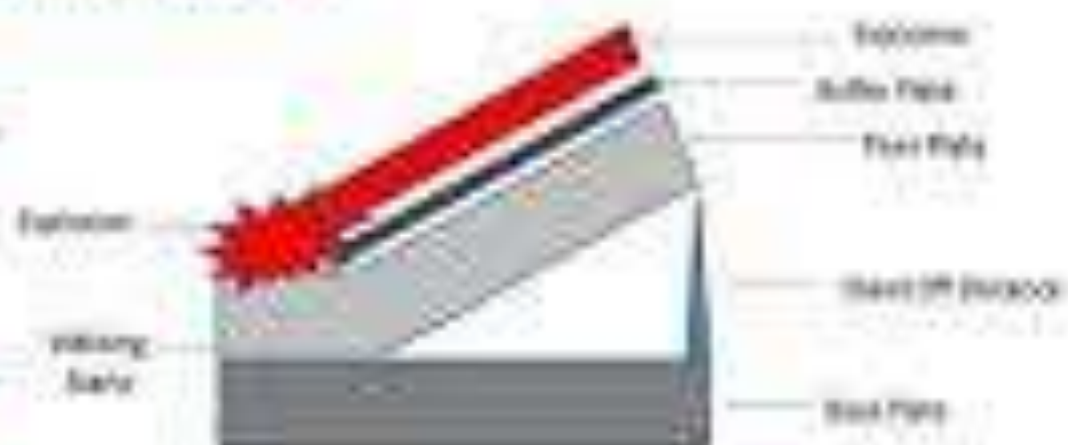


After forge welding

Forge Welding



Friction Welding



Explosive Welding

DIFFUSION WELDING

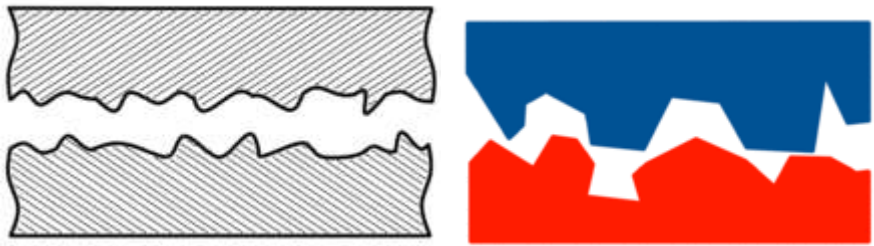
Class: Solid State Welding

Energy Source:

DIFFUSION WELDING (DFW)

A solid-state welding process producing a weld by the application of pressure at elevated temperature with no macroscopic deformation or relative motion of the workpieces. A solid filler metal may be inserted between the faying surfaces. See also cold welding, diffusion aid, forge welding, and hot pressure welding.

AWS A3.0M/A3.0:2010



Diffusion bonding or diffusion welding is a solid-state welding technique used in metalworking, capable of joining similar and dissimilar metals. It operates on the principle of solid-state diffusion, wherein the atoms of two solid, metallic surfaces intersperse themselves over time. This is typically accomplished at an elevated temperature, approximately 50-70% of the absolute melting temperature of the materials. Diffusion bonding is usually implemented by applying high pressure, in conjunction with necessarily high temperature, to the materials to be welded; the technique is most commonly used to weld "sandwiches" of alternating layers of thin metal foil, and metal wires or filaments.[1] Currently, the diffusion bonding method is widely used in the joining of high-strength and refractory metals within the aerospace and nuclear industries.

Diffusion bonding involves no liquid fusion, and often no filler metal. No weight is added to the total, and the joint tends to exhibit both the strength and temperature resistance of the base metal(s). The materials endure no, or very little, plastic deformation. Very little residual stress is introduced, and there is no contamination from the bonding process. It may be performed on a joint surface of theoretically any size with no increase in processing time; practically speaking, the surface tends to be limited by the pressure required and physical limitations. It may be performed with similar and dissimilar metals, reactive and refractory metals, or pieces of varying thicknesses.

Diffusion bonding is most often used for jobs either difficult or impossible to weld by other means, due to its relatively high cost. Examples include welding materials normally impossible to join via liquid fusion, such as zirconium and beryllium; materials with very high melting points such as tungsten; alternating layers of different metals which must retain strength at high temperatures; and very thin, honeycombed metal foil structures.[4][5][6]

Диффузионная сварка

В 1953 г. профессором Н.Ф. Казаковым был разработан принципиально новый способ соединения материалов – **диффузионная сварка** в вакууме. При **диффузионной сварке** сварное соединение образуется в результате совместного воздействия давления и нагрева. Отличительной особенностью диффузионной сварки является применение относительно высоких температур нагрева и низких удельных давлений, обычно не превышающих предела текучести свариваемых материалов при температуре сварки. При **диффузионной сварке** выделяют две основные стадии образования качественного сварного соединения.

Давление, применяемое при способах сварки без расплавления материалов, по современным представлениям, выполняет три задачи: - разрушение в результате пластического течения поверхностных слоев металла и частичное удаление окисных пленок и загрязнений; - сближение свариваемых поверхностей для обеспечения физического контакта и эффективного атомного взаимодействия; - обеспечение активации поверхностей для протекания процессов диффузии и рекристаллизации. Процесс может осуществляться с использованием различных тепловых источников нагрева. Чаще всего на практике находят применение индукционный, радиационный, электронно-лучевой нагрев, а также нагрев проходящим током, тлеющим разрядом и в расплаве солей. В последнем случае расплав солей выполняет роль среды, в которой осуществляется диффузионная сварка. Кроме вакуума, в качестве среды могут быть использованы защитные или восстановительные газы. При сварке материалов, имеющих относительно небольшое сродство к кислороду, процесс можно вести на воздухе. В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести. При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования. По второй схеме нагрузка и пластическое деформирование обеспечиваются специальным устройством, которое перемещается в процессе сварки с контролируемой скоростью. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования. Диффузионной сваркой в вакууме практически освоено соединение около 500 композиций металлов, сплавов и неметаллических материалов.

К настоящему времени создано более 70 типов **установок диффузионной сварки**. Каждая установка, независимо от ее типа, должна включать в себя **пять основных систем** (рис. 1.43):

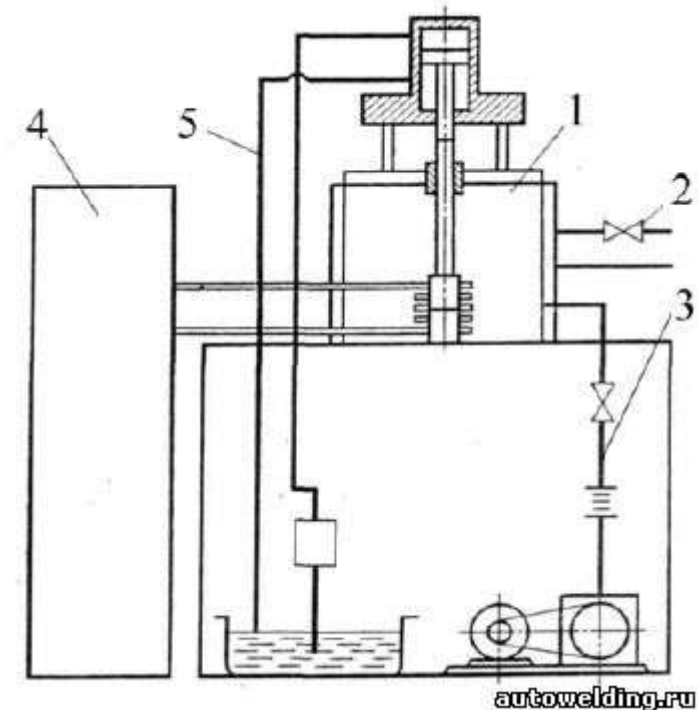


Рис. 1.43.: 1 – рабочая камера; 2 – система охлаждения; 3 – вакуумная система; 4 – источник нагрева; 5 - система давления

создания вакуума или контролируемой атмосферы (3);
сжатия свариваемых деталей (5);
нагрева (4);
охлаждения (2);
контроля параметров сварки и управления процессом.

Разработка и создание установок для диффузионной сварки в настоящее время ведутся в направлении унификации систем (вакуумной, нагрева, давления, управления) и сварочных камер. Меняя камеру в этих установках, можно значительно расширить номенклатуру свариваемых узлов. С помощью диффузионной сварки в вакууме, кроме уже отмеченных соединений металлов и сплавов, получают высококачественные соединения керамики с коваром, медью, титаном; электровакуумных стекол, оптической керамики, сапфира, графита с металлами; композиционных и порошковых материалов и др. Соединяемые заготовки могут быть весьма различны по своей форме, иметь компактные или развитые поверхности контактирования. Геометрические размеры свариваемых деталей находятся в пределах от нескольких микрометров (при изготовлении полупроводниковых приборов) до нескольких метров (при изготовлении слоистых конструкций).

Способ соединения диффузионной сваркой является экономичным. Он не требует дорогостоящих припоев, специальной проволоки и электродов, флюсов, защитных газов. Более того, отпадает последующая механическая обработка и потеря ценного металла; масса конструкции не увеличивается, что имеет место при сварке, пайке и склеивании. Свойства металла в зоне соединения не изменяются, поэтому термическая обработка необязательна. Установки для диффузионной сварки можно устанавливать в линиях механической обработки и сборки деталей и узлов. Расход энергии и мощности потребления их на сварку в 4—6 раз меньше, чем, например,

при [контактной сварке](#).

Диффузионную сварку от других видов сварки отличает гигиеничность процесса: отсутствие ультрафиолетового излучения, вредных брызг металла, мелкодисперсной пыли, что весьма важно для охраны здоровья работающих.

Опыт многих предприятий, НИИ, КБ показал, что диффузионная сварка успешно конкурирует с другими традиционными видами сварки.

За последнее время взгляды на диффузионную сварку принципиально изменились. Из процесса для соединения материалов, которые трудно или невозможно соединять обычными способами сварки плавлением и пайки, она превратилась в общедоступный процесс соединения как небольших деталей, так и крупных; установлена ее конкурентоспособность с существующими способами сварки плавлением и пайкой.

Далее [Диффузионная сварка однородных металлических материалов](#)

Источник: [Николаев Г.А. "Сварка в машиностроении. Справочник. Т.1"](#)

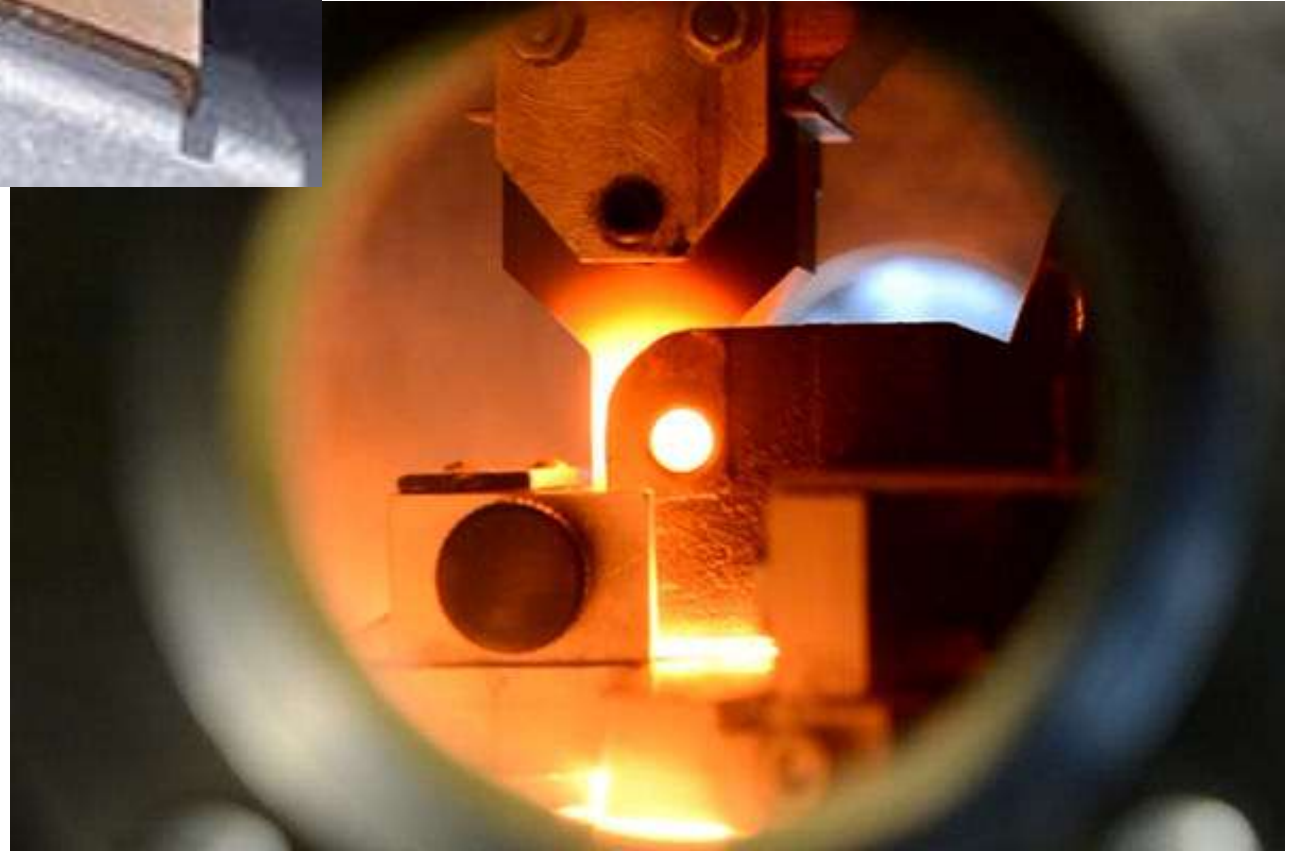
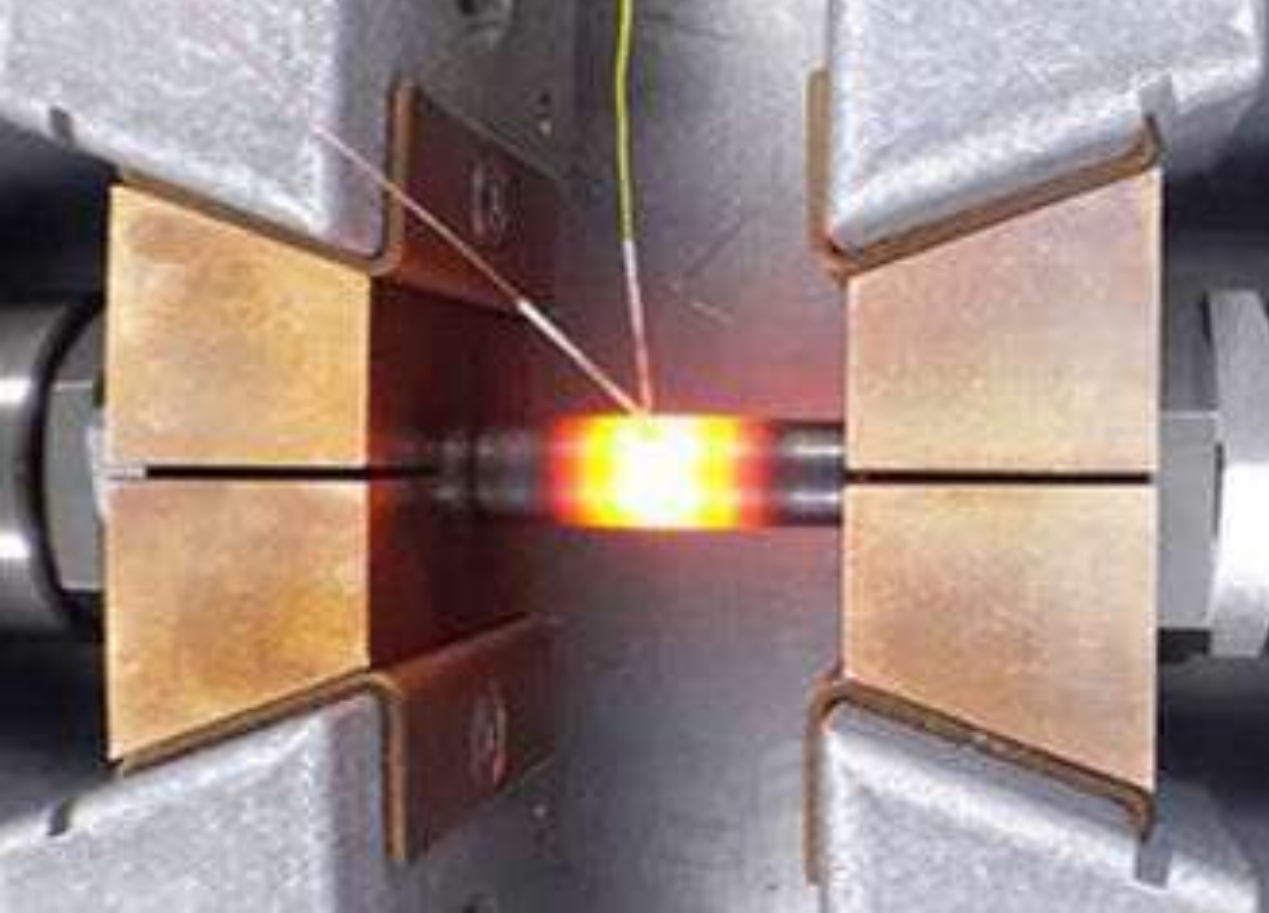
[Конюшков Г.В., Мусин Р.А. "Специальные методы сварки давлением"](#)

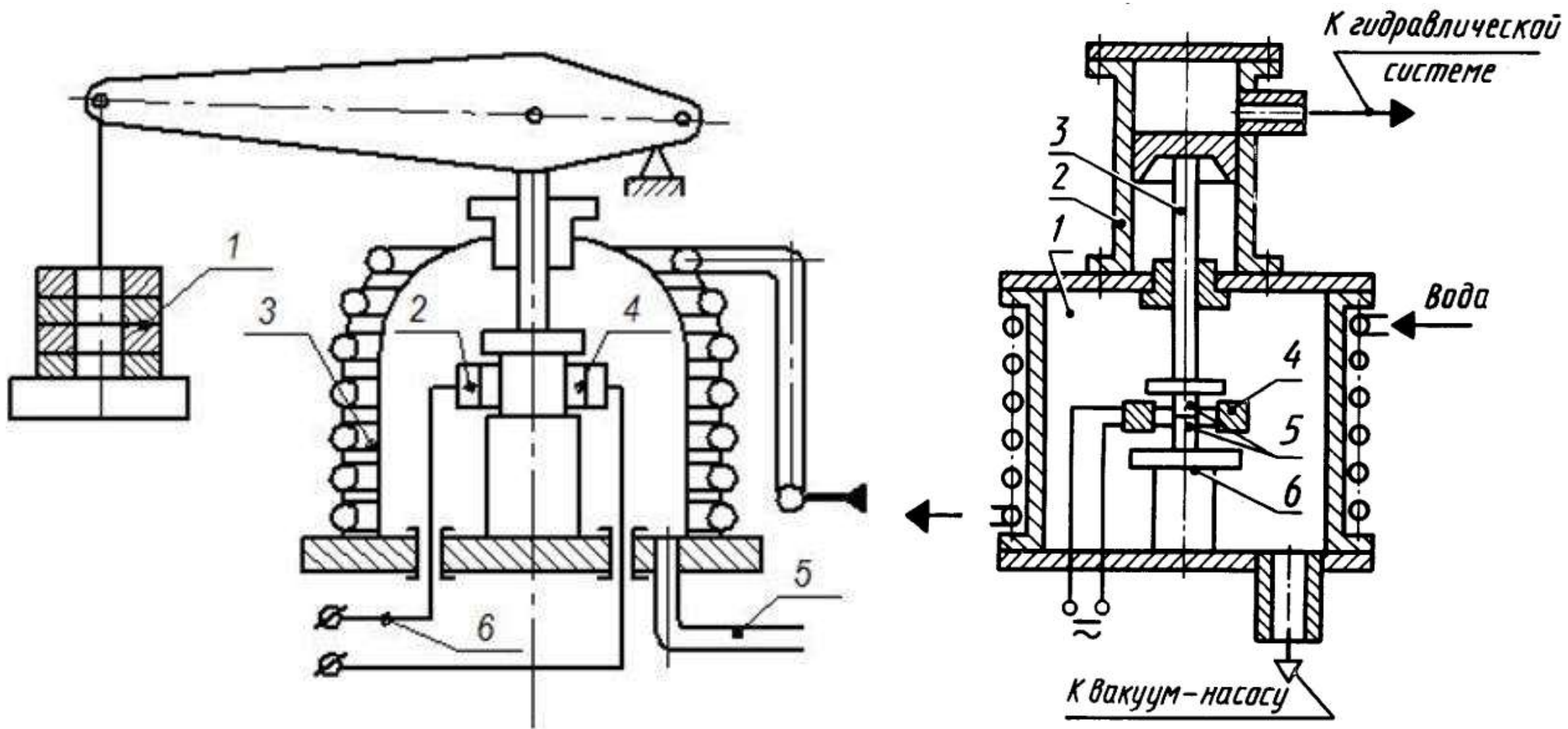
[М.П. Шалимов, В.И. Панов "Сварка Вчера, Сегодня, Завтра". Екатеринбург, 2006](#)

Benefits^[edit]

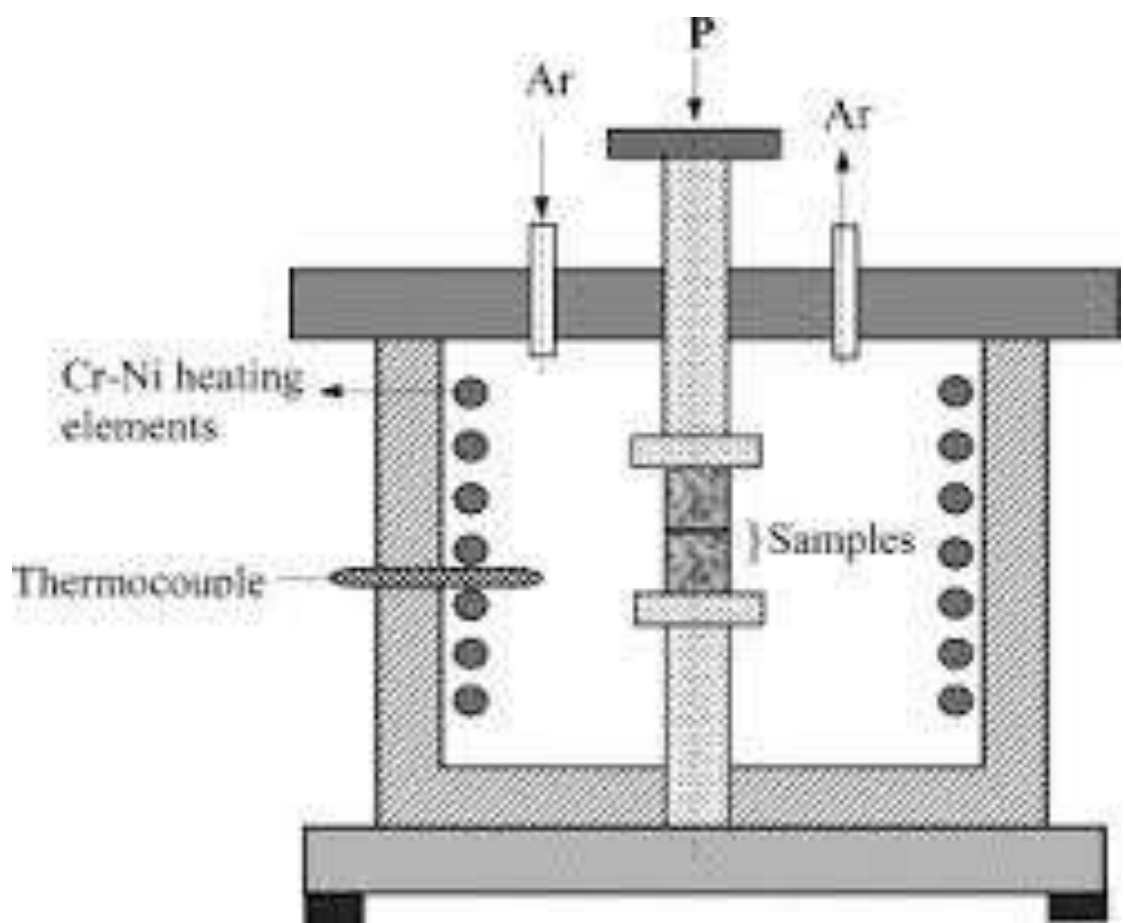
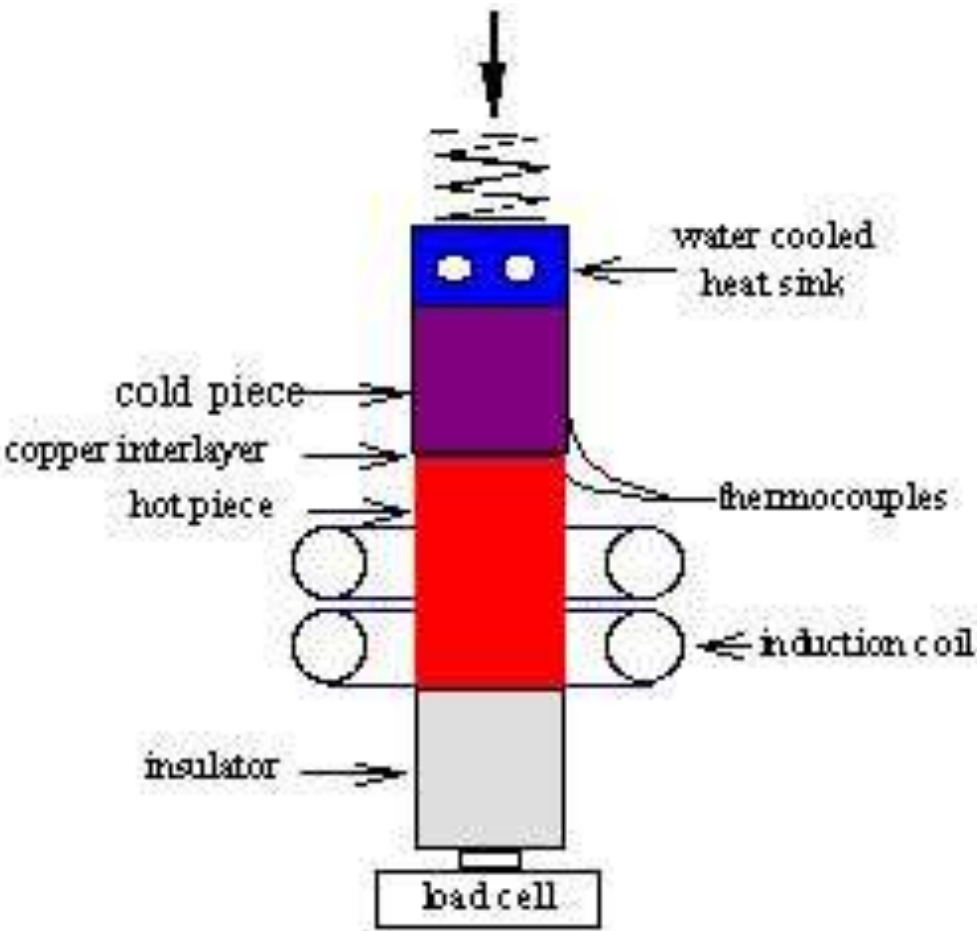
- The bonded surface has the same physical and mechanical properties as the base material. Once we have finished the joining, we could also perform the test of the joining materials, for example, [tensile testing](#).
- The diffusion bonding process is able to produce a high quality joints in which case no discontinuity and porosity exists in the interface.^[9] In other words, we are able to sand, manufacture and heat the material.
- The diffusion bonding is able to help us to build high precision components with complex shapes. Also, diffusion is flexible.
- The diffusion bonding method can be used widely, joining either similar or dissimilar materials, and also important in processing composite materials.
- The process is not extremely hard to approach and the cost to perform the diffusion bonding is not high.^[10]
- The material under diffusion is able to reduce the plastic deformation.







Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме



<https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Amir/bond.html>
<https://www.mechgrid.com/welding-and-their-types.html>

Diffusion bonding, as a subdivision of both solid-state welding and liquid-phase welding, is a joining process wherein the principal mechanism is interdiffusion of atoms across the interface. Diffusion bonding of most metals is conducted in vacuum or in an inert atmosphere (normally dry nitrogen, argon or helium) in order to reduce detrimental oxidation of the faying surfaces. Bonding of a few metals which have oxide films that are thermodynamically unstable at the bonding temperature (e.g. silver) may be achieved in air.

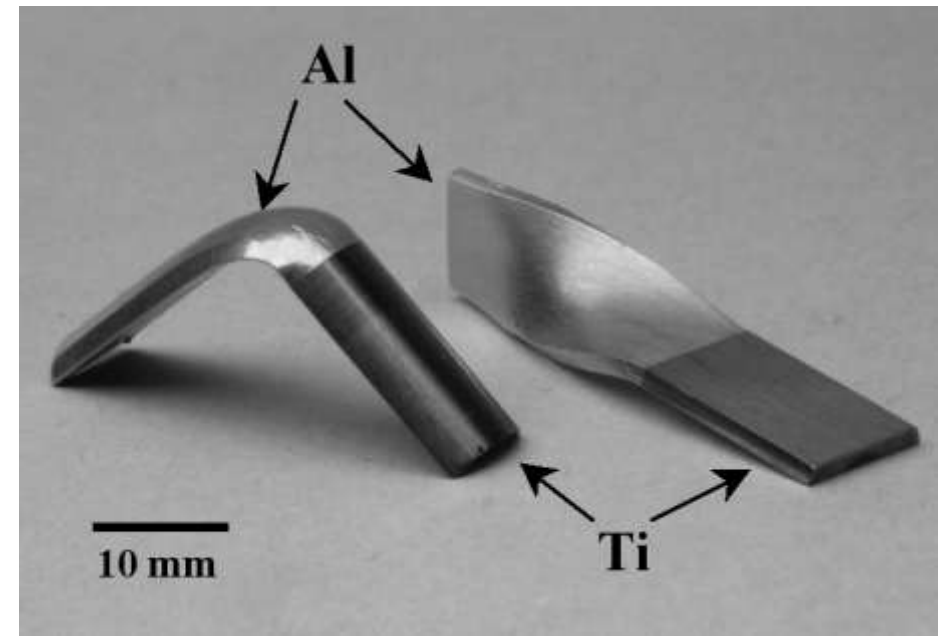
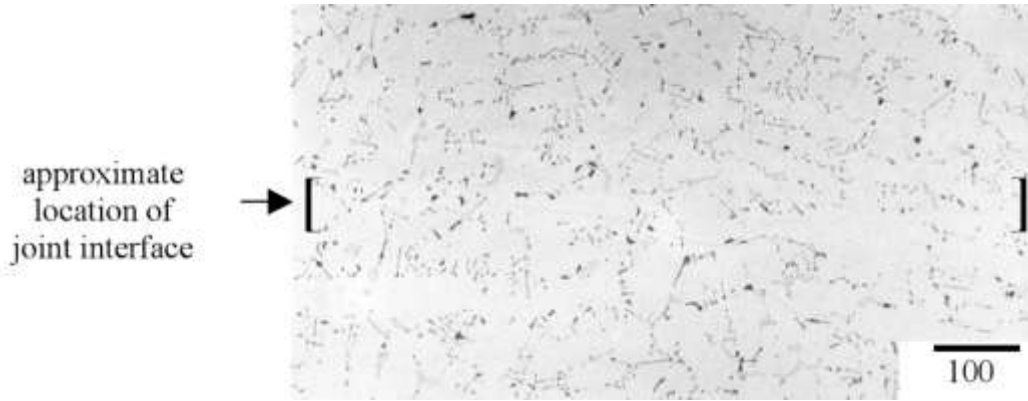
Solid-state Diffusion Bonding

Solid-state diffusion bonding is a process by which two nominally flat interfaces can be joined at an elevated temperature (about 50%-90% of the absolute melting point of the parent material) using an applied pressure for a time ranging from a few minutes to a few hours. The International Institute of Welding (IIW) has adopted a modified definition of solid-state diffusion bonding, proposed by Kazakov [2].

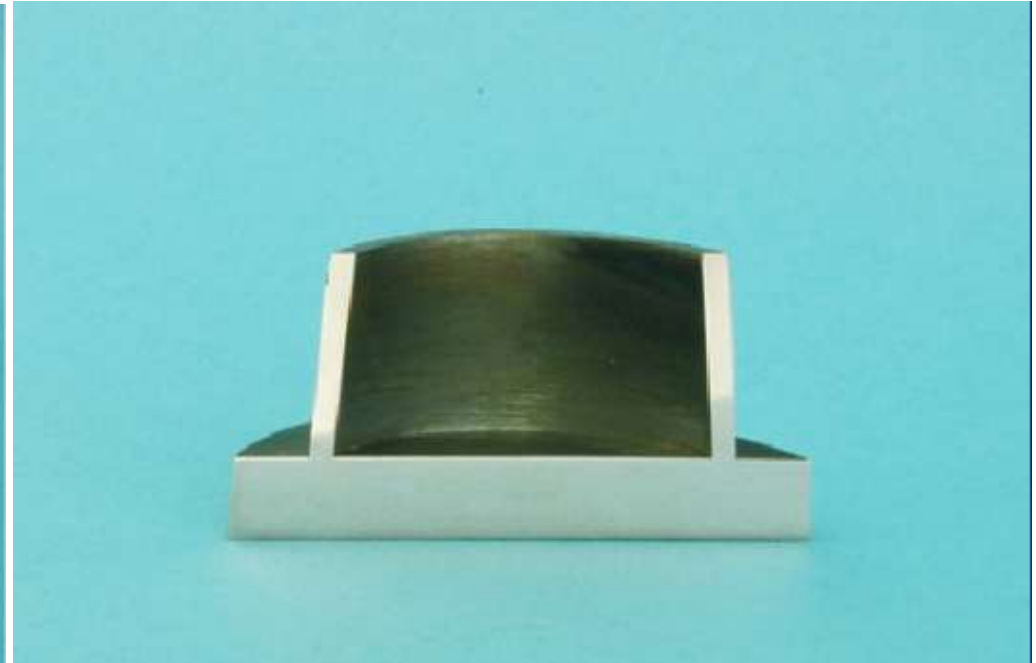
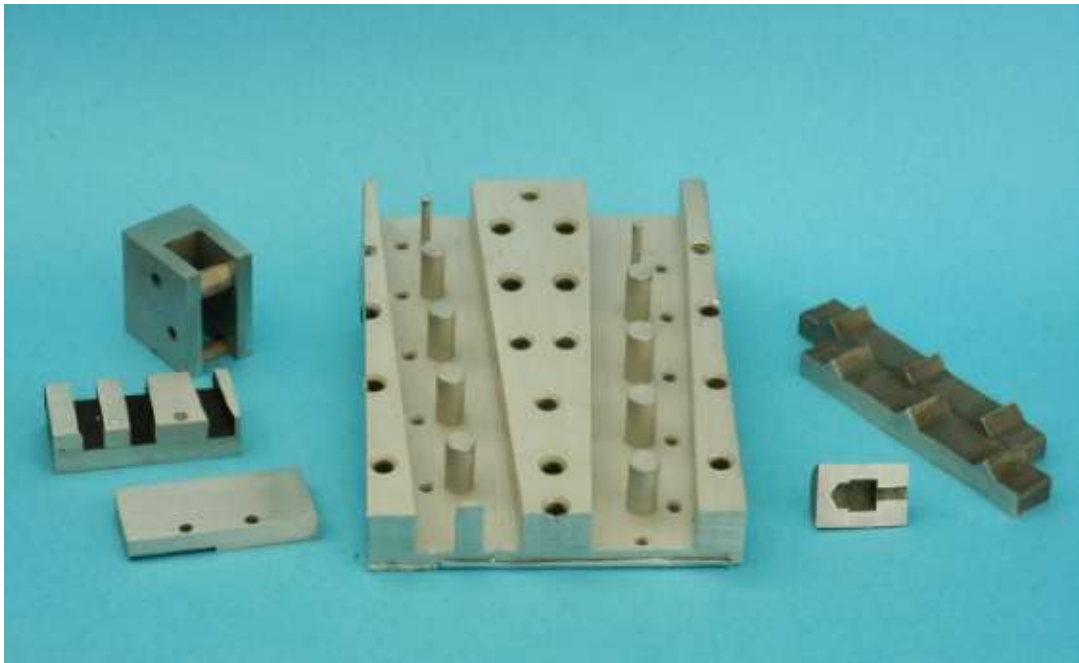
Diffusion bonding of materials in the solid state is a process for making a monolithic joint through the formation of bonds at atomic level, as a result of closure of the mating surfaces due to the local plastic deformation at elevated temperature which aids interdiffusion at the surface layers of the materials being joined.

Advantages of solid-state diffusion bonding:

1. The process has the ability to produce high quality joints so that neither metallurgical discontinuities nor porosity exist across the interface.
2. With properly controlled process variables, the joint would have strength and ductility equivalent to those of the parent material. Failure of the diffusion bonded aluminium samples (bonds 1 and 2), subjected to tensile force, occurred in the parent alloy (shown by arrows) and away from the bond line.
3. Joining of dissimilar materials with different thermo-physical characteristics, which is not possible by other processes, may be achieved by diffusion bonding. Metals, alloys, ceramics and powder metallurgy products have been joined by diffusion bonding. The picture shows dissimilar bonds in Al-6082 and **Ti-6Al-4V** tested by bending and torsion tests. No preferential failure at the joint interfaces occurred.
4. High precision components with intricate shapes or cross sections can be manufactured without subsequent machining. This means that good dimensional tolerances for the products can be attained.
5. Apart from the initial investment, the consumable costs of diffusion bonding are relatively low as no expensive solder, electrodes, or flux are required (although the capital costs and the costs associated with heating for relatively long times may be high).
6. Diffusion bonding is free from ultraviolet radiation and gas emission so there is no direct detrimental effect on the environment, and health and safety standards are maintained.



Optical micrograph of the diffusion bond in a cobalt-base superalloy, free from flaws, voids and loss of alloying elements [3].



Representative high-precision components which fabricated from aluminium (left) and stainless steel (right) using diffusion bonding.

Limitations of diffusion bonding

1. Great care is required in the surface preparation stage. Excessive oxidation or contamination of the faying surfaces would decrease the joint strength drastically. Diffusion bonding of materials with stable oxide layers is very difficult. Production of thoroughly flat surfaces and also precise fitting-up of the mating parts takes a longer time than with conventional welding processes.
2. The initial investment is fairly high and production of large components is limited by the size of the bonding equipment used.
3. The suitability of this process for mass production is questionable, particularly because of the long bonding times involved.

Variants of solid-state diffusion bonding are also referred to by the following terms:

diffusion welding

hot press bonding

solid-state bonding

pressure bonding

auto-vacuum welding

pressure joining

isostatic bonding

thermo-compression welding

Problems with solid-state diffusion bonding

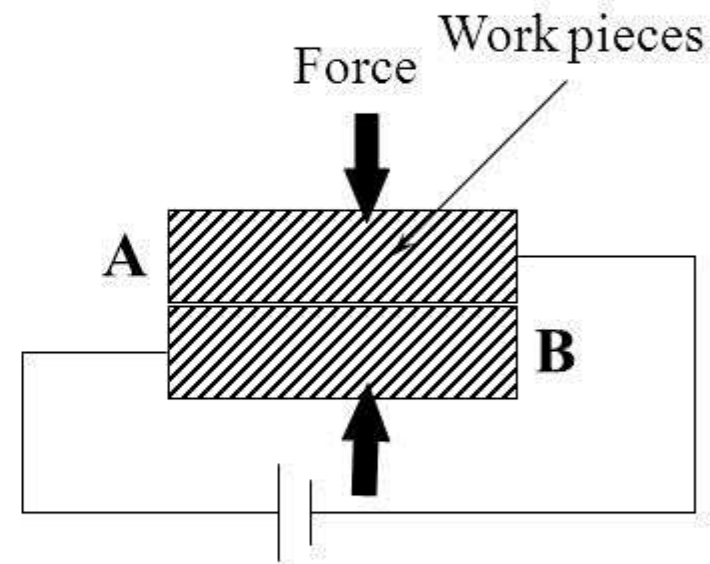
The aim in diffusion bonding is to bring the surfaces of the two pieces being joined sufficiently close that interdiffusion can result in bond formation. There are two major obstacles that need to be overcome in order to achieve satisfactory diffusion bonds.

- Even highly polished surfaces come into contact only at their asperities and hence the ratio of contacting area to faying area is very low.
- In most metals, the presence of oxide layers at the faying surfaces will affect the ease of diffusion bonding. For some metals and alloys, their oxide films either dissolve in the bulk of the metal or decompose at the bonding temperature (e.g. those of many steels, copper, titanium, tantalum, columbium and zirconium), and so metal-to-metal contact can be readily established at the interface. The joining of these materials is relatively straightforward and is not included in this review. However, if the oxide film is chemically stable, as for aluminium-based alloys, then achieving a metallic bond can be difficult.

In practice, because of inevitable surface roughness and also the presence of oxide layers on most faying surfaces, it is neither feasible to bring together the surfaces of two pieces within interatomic distances nor to establish complete metal-to-metal contact by simply putting two pieces together. See Ref. [4] for various aspects of the effects of surface oxides on interface morphology and bond strength, and a summary of the existing approaches used to overcome the oxide problem.

Definition of Diffusion Welding

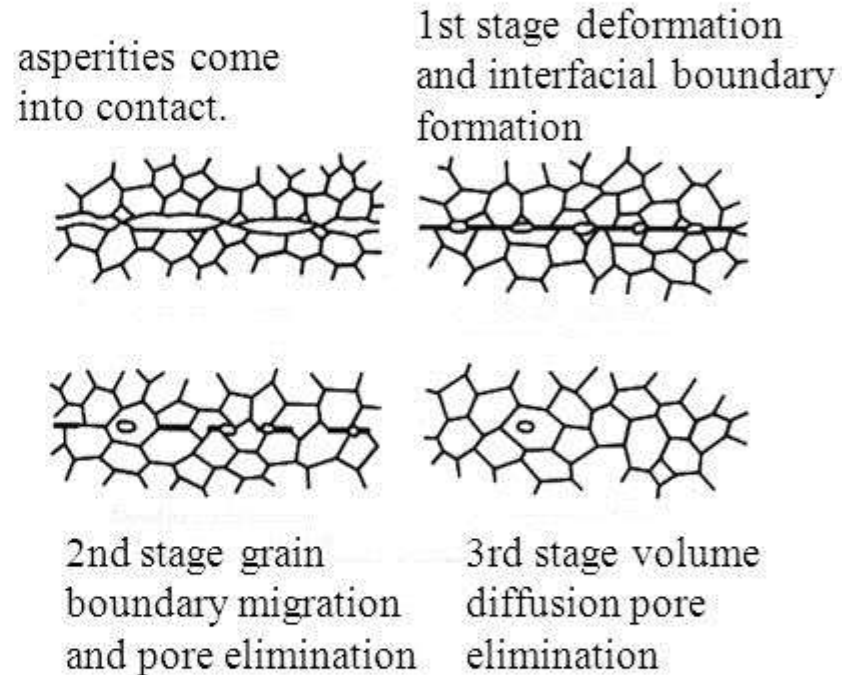
- A solid-state welding process that produces coalescence of the faying surfaces by the application of pressure at elevated temperature.
- The process does not involve macroscopic deformation, or relative motion of the workpieces.
- A solid filler metal may or may not be inserted between the faying surfaces.



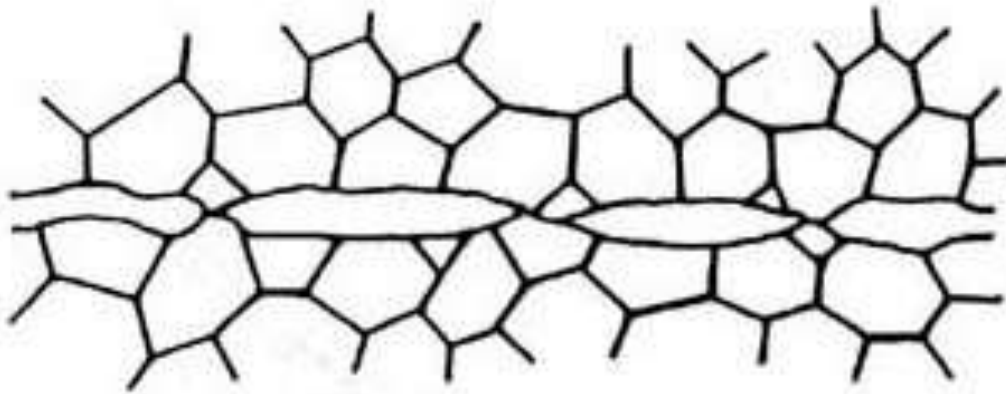
Schematic representation of diffusion welding using electrical resistance for heating

Diffusion Welding Working Principles

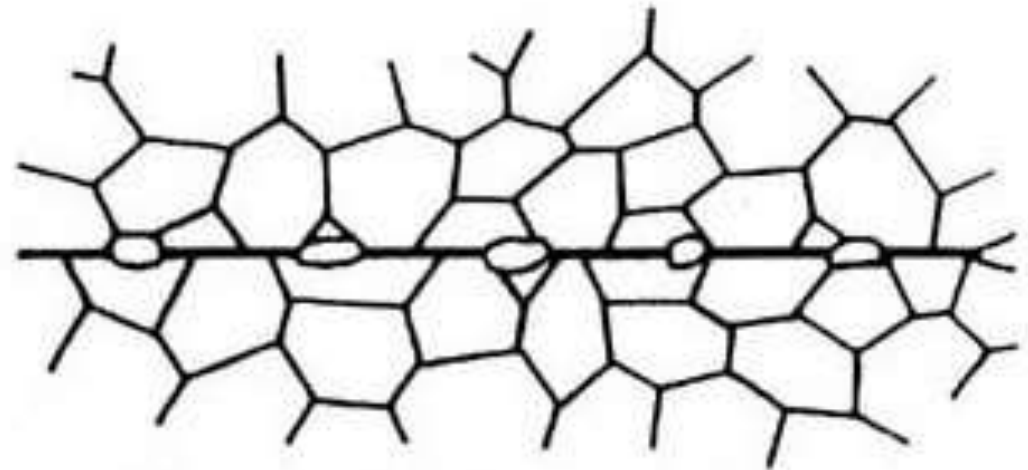
- 1st stage
 - deformation forming interfacial boundary.
- 2nd stage
 - Grain boundary migration and pore elimination.
- 3rd stage
 - Volume diffusion and pore elimination.



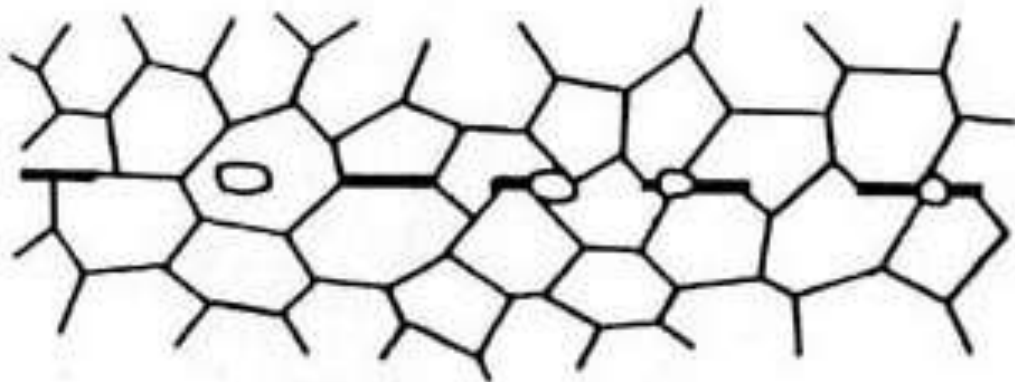
DIFFUSION WELDING STAGES



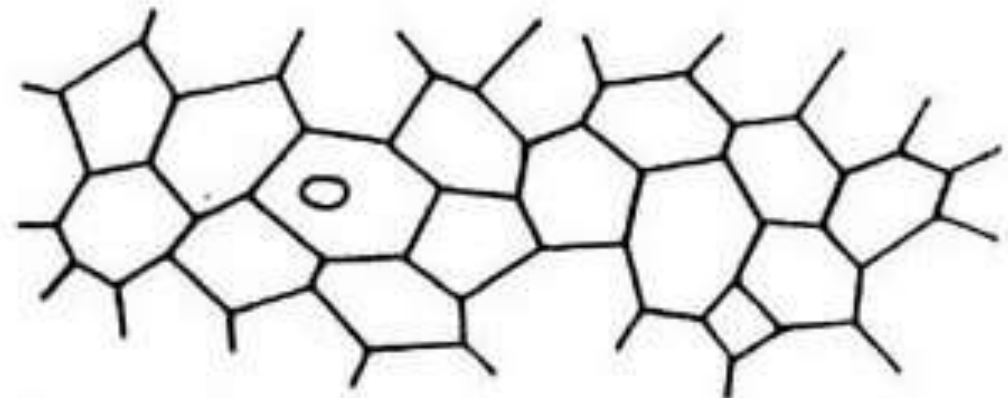
Initial asperity contact



First stage deformation and interfacial boundary formation



Second stage grain boundary migration and pore elimination



Third stage volume diffusion pore elimination

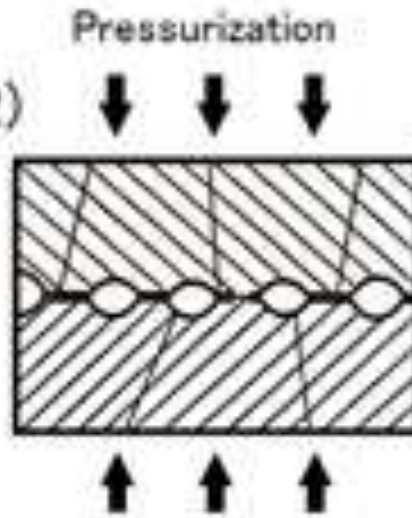
DIFFUSION WELDING STAGES

Flow of junction

(1)



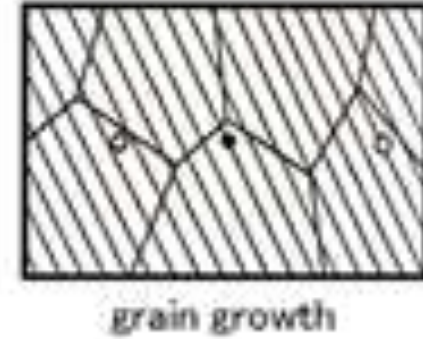
(2)



(3)



(4)



Диффузионная сварка осуществляется в твердом состоянии металла при повышенных температурах с приложением сдвливающего усилия к месту сварки. Процесс сварки металла в твердом состоянии при повышенных температурах принципиально протекает так же, как, и при холодной сварке. В начальной стадии процесса на линии раздела двух деталей создаются условия для образования металлических связей. Из теории образования сварного соединения при холодной сварке известно, что для возникновения на линии раздела металлических связей необходимо обеспечить тесный контакт свариваемых поверхностей и создать условия для удаления поверхностных пленок окислов, жидкостей, газов и различного рода загрязнений.

Использование повышенных температур **при диффузионной сварке** приводит к уменьшению сопротивления металла пластическим деформациям. Вследствие этого имеющиеся в зоне действительного контакта выступы на металле деформируются при значительно меньших нагрузках, что облегчает сближение атомов металла на всей площади свариваемой поверхности.

Удаление поверхностных пленок и предупреждение возможности образования их в процессе сварки достигается использованием вакуумной защиты и тщательной предварительной зачисткой свариваемых поверхностей. Таким образом, первая стадия процесса диффузионной сварки, так же как и холодной сварки, основана на образовании металлических связей на свариваемых поверхностях металлов при нагревании их в вакууме с применением сдвливающего усилия.

На второй стадии процесса диффузионной сварки происходят процессы взаимной диффузии атомов свариваемых металлов. Эти процессы приводят к образованию промежуточных слоев, увеличивающих прочность сварного соединения. Однако в некоторых случаях образование промежуточных слоев нежелательно.

Схема процесса диффузионной сварки в вакууме представлена на рис. 33. В вакуумной охлаждаемой камере 1 размещают свариваемое изделие 2 и нагреватель 3. Для сдвливания деталей в процессе сварки используют механизм сжатия, состоящий из штока 5 и механизма нагружения 6, шток проходит через вакуумное уплотнение или сильфон 4. Сварка происходит в вакууме 10^{-3} — 10^{-5} мм рт. ст. ($133 \cdot 10^{-3}$ — $133,1 \cdot 10^5$ Н/м²).

После откачки из камеры воздуха изделие нагревают обычно т. в. ч. до температуры сварки. Для получения качественного соединения необходимо обеспечить равномерный нагрев свариваемого изделия по всему сечению.

Усилие сжатия прикладывают после выравнивания температуры и поддерживают постоянным в течение всего процесса. Известны также технологические приемы с меняющимся давлением в процессе сварки. Продолжительность выдержки под нагрузкой зависит от свойств свариваемого металла, величины давления и других факторов и может достигать десятков минут.

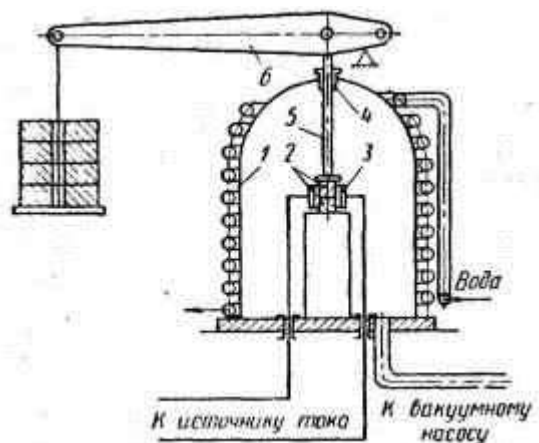


Рис.33. Схема установки для диффузионной сварки в вакууме

Давление также зависит от свойств металла, температуры сварки и других факторов и изменяется от 0,3 до 10 кгс/мм² (2,9—98 МН/м²). Обычно при охлаждении деталей сжимающее усилие снимают при достижении температуры 100—400°С (373—673 К). Преждевременное снятие сжимающего усилия при охлаждении деталей в некоторых случаях приводит к разрушению сварного соединения.

Влияние температуры в диапазоне 800—1100° С (1073— 1373 К) на прочность соединения из стали 50 при различных давлениях: 0,5; 1,2 и 5 кгс/мм² приведено на рис. 34. Продолжительность сварки 5 мин, разрежение 10⁻³ мм рт. ст. (133·10⁻³ Н/м²). Кривая 1 показывает, что при увеличении температуры с 800 до 900° С (с 1073 до 1173 К) прочность соединения увеличивается в 2 раза, а при повышении температуры до 1100°С (1373 К) — в 3 раза. В несколько меньшей степени температура оказывает влияние при давлении 1 кгс/мм² (9,8 МН/м²). При давлении 2 и 5 кгс/мм² (19,6 и 49,0 МН/м²) прочность соединения увеличивается лишь до температуры 1000° С (1273 К). При температуре 1100° С (1373 К) наблюдается незначительное уменьшение прочности соединения.

При увеличении давления (рис. 35) от 0,5 до 2 кгс/мм² (от 4,9 до 19,6 МН/м²) прочность соединения значительно растет для 800, 900, 1000, 1100°С (1073, 1173, 1273, 1373 К). Дальнейшее увеличение давления от 2 до 5 кгс/мм² (от 19,6 до 49,0 МН/м²) сказывается незначительно на прочности соединения. Изменение прочности соединения при увеличении давления до 2 кгс/мм² (19,6 МН/м²) и выше можно объяснить главным образом увеличением площади фактического контакта между соединяемыми поверхностями.

Повышение температуры при постоянной продолжительности сварки и прочих равных условиях увеличивает прочность соединения. Продолжительность сварки аналогично влияет на все прочностные характеристики (рис. 36). Зависимость прочности получаемого соединения из стали 45 от температуры и давления изображена на рис. 37 поверхностью, которая при пересечении с горизонтальной плоскостью р—Т образует границу свариваемости.

С увеличением продолжительности сварки прочность сварного соединения растет (рис. 38), увеличение продолжительности сварки сверх оптимального практически не влияет на прочность сварного соединения. Однако чрезмерное увеличение выдержки приводит даже к снижению прочности сварного соединения. Аналогичным образом влияет продолжительность процесса на пластичность, относительное удлинение и ударную вязкость.

Значительное влияние оказывает конечная температура охлаждения образцов в вакууме на прочность и пластичность (рис. 39); режим сварки: Т = 1000° С (1273 К), р = 2 кгс/мм² (19,6 МН/м²), t = 5 мин. Охлаждение до более низких температур под сжимающим давлением сваренных деталей в вакуумной камере способствует повышению прочности и пластичности соединения.

Важное значение для проведения диффузионной сварки имеет степень разрежения в вакуумной камере. При температуре 1000° С (1273 К), р = 2 кгс/мм² (19,6 МН/м²), t = 5 мин прочность соединения значительно возрастает с повышением разрежения. До 10⁻¹ мм рт. ст. (133·10⁻¹ Н/м²), при дальнейшем повышении разрежения имеет место лишь незначительное увеличение прочности зоны сварки.

Способы подготовки и обработки поверхностей свариваемых деталей оказывают большое влияние на прочность соединения при диффузионной сварке в вакууме (рис. 40). При черновой обработке давление недостаточно для обеспечения высокой прочности сварного соединения.

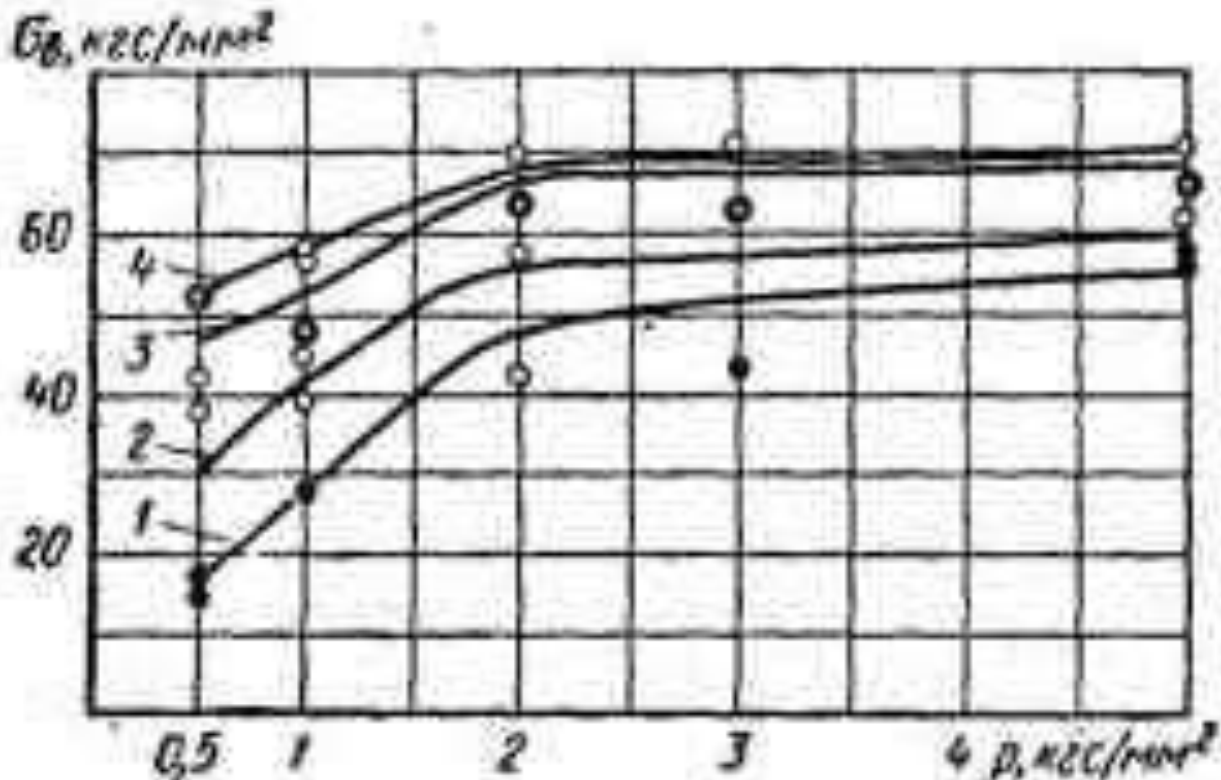
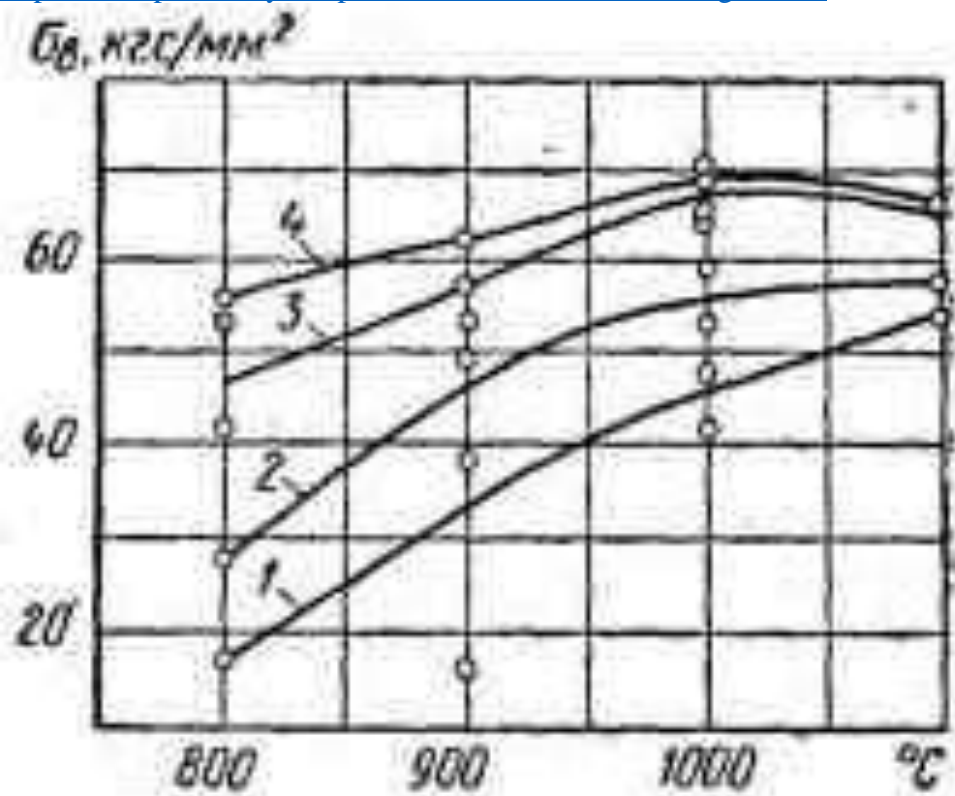


Рис.34. Зависимость прочности сварного соединения (сталь 50) от температуры сварки (время сварки 5 мин) и давления в процессе сварки: 1 - 0,5 кгс/мм²; 2 - 1 кгс/мм²; 3 - 2 кгс/мм²; 4 - 5 кгс/мм²

Рис. 35. Зависимость прочности сварного соединения (сталь 50) от давления и температуры (время сварки 5 мин): 1 - T = 800° C; 2 T - 900° C; 3 - T = 1000° C; 4-T=1100° C

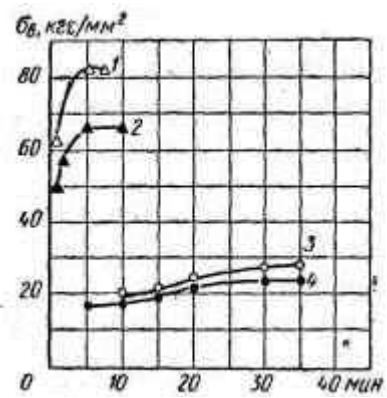


Рис.36. Зависимость прочности сварного соединения от продолжительности сварки: 1 — титановый сплав ВТІ; 2 — сталь 45; 3 — ковар Н28К18; 4 — медь МІ

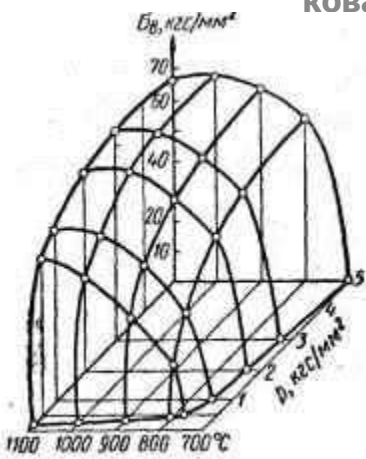


Рис.37. Диаграмма зависимости прочности сварного соединения из стали 45 от температуры и давления

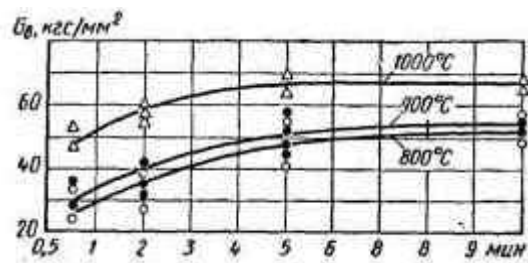


Рис.38. Зависимость прочности образцов сварных соединений от продолжительности сварки ($p = 2 \text{ кгс/мм}^2$)

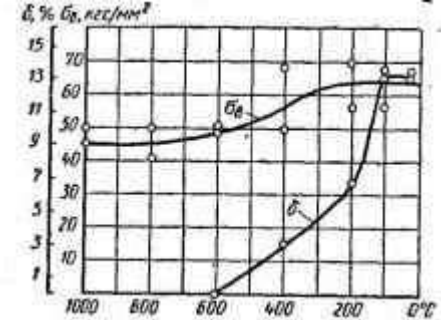


Рис.39. Зависимость прочности и пластичности соединения из конструкционной стали от конечной температуры охлаждения в вакууме

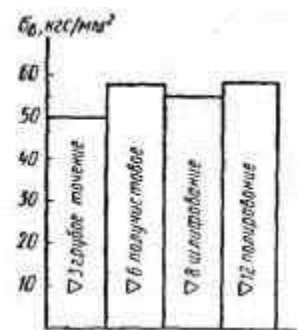
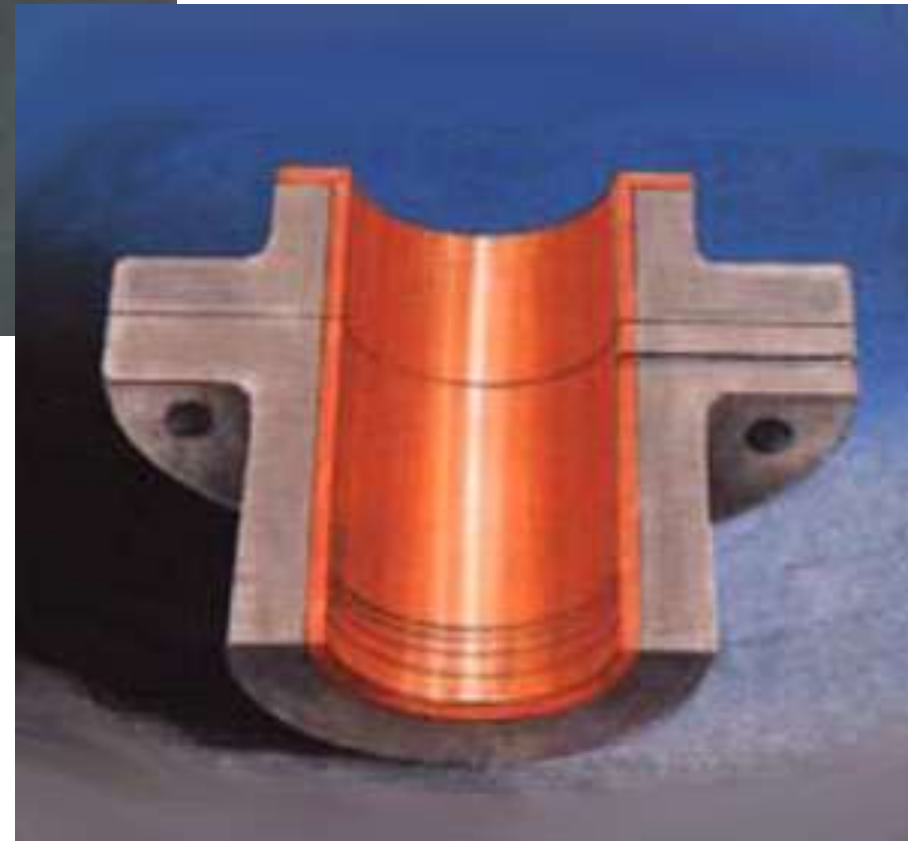
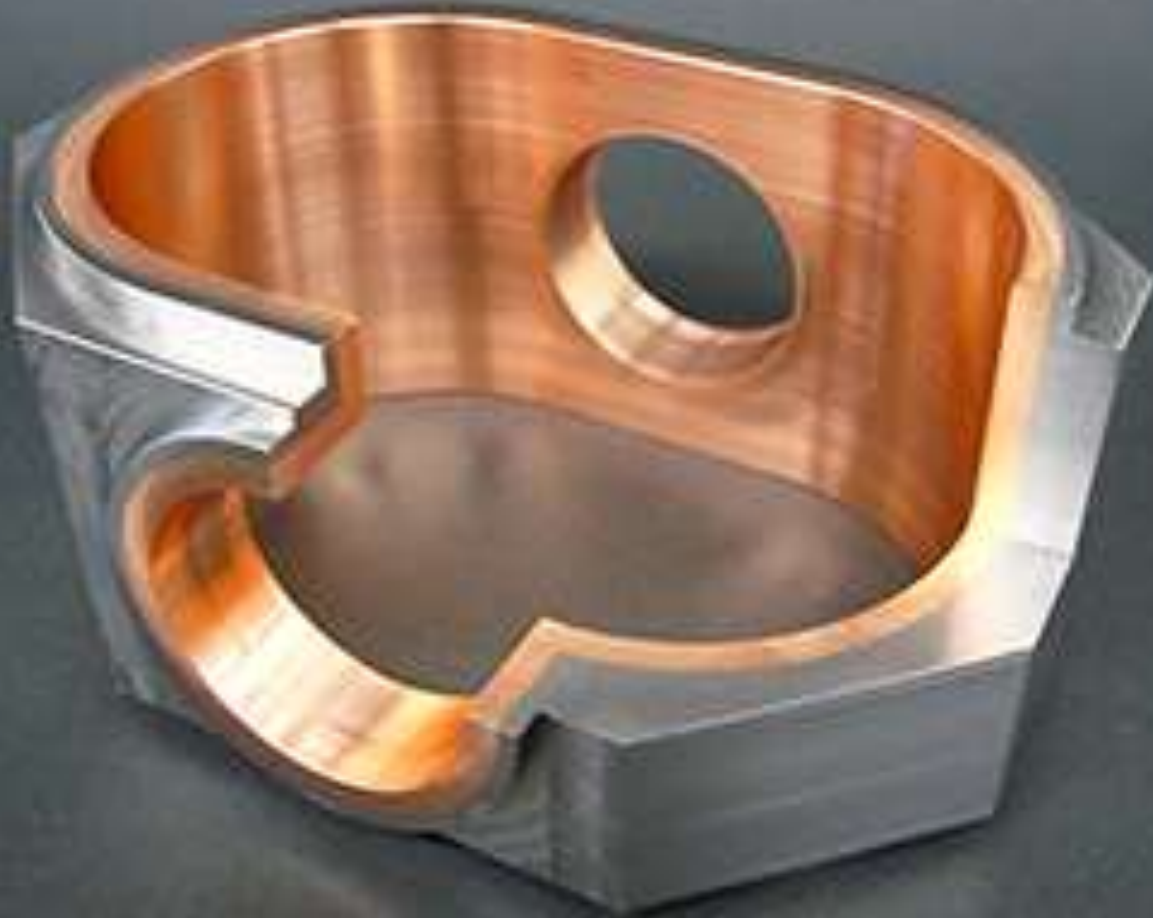
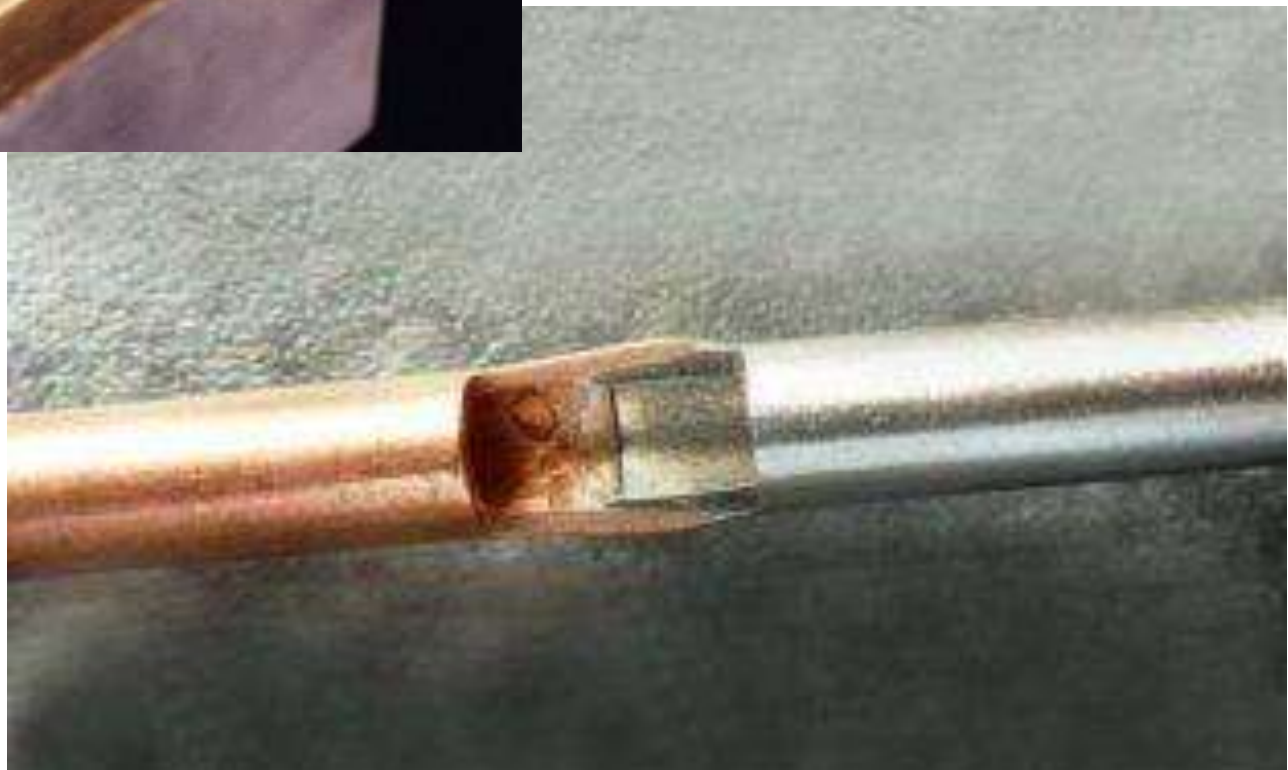
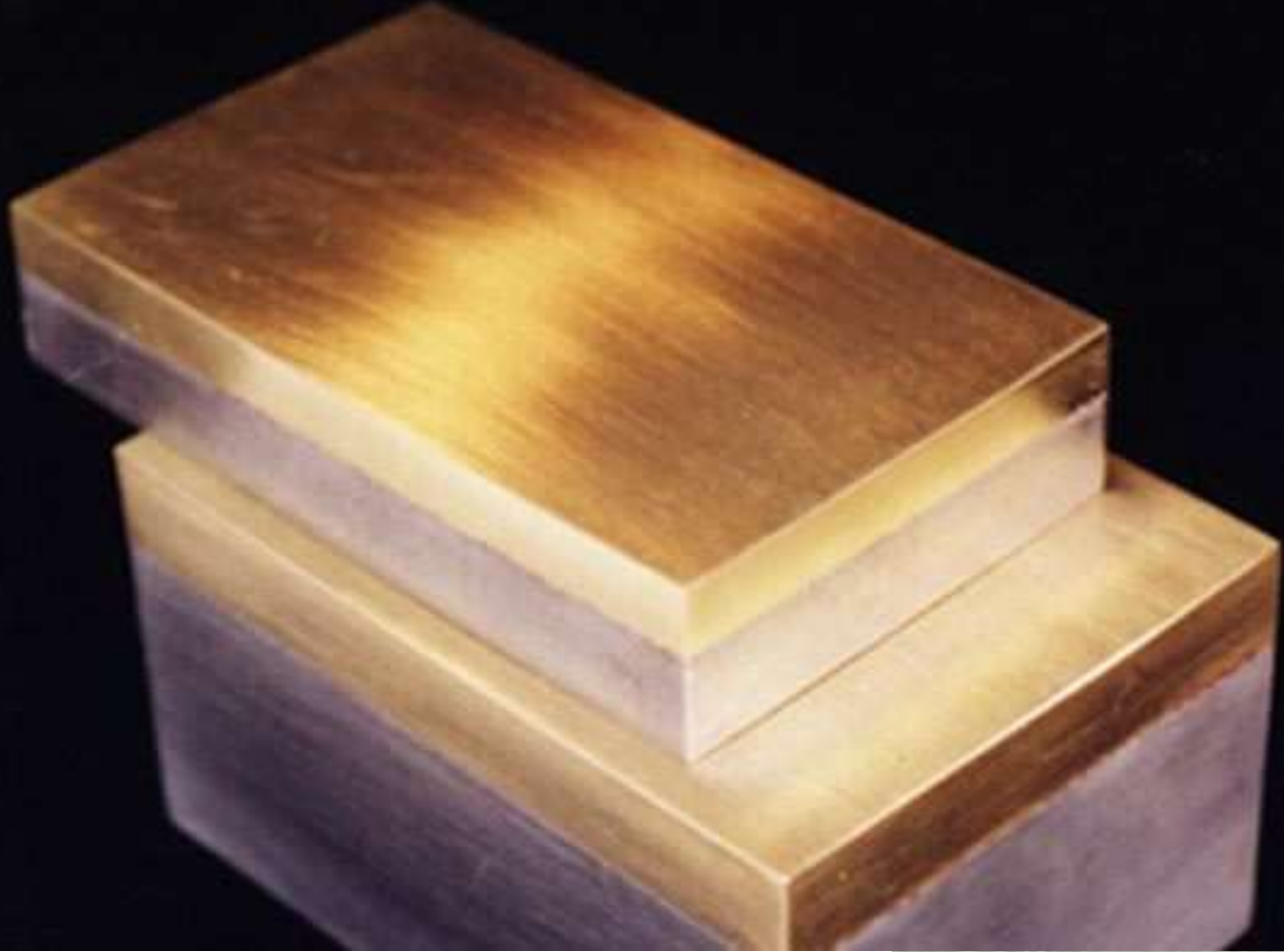


Рис.40. Зависимость прочности сварного соединения из стали 45 от чистоты Обработки поверхности перед сваркой

DIFFUSION WELDING SAMPLES







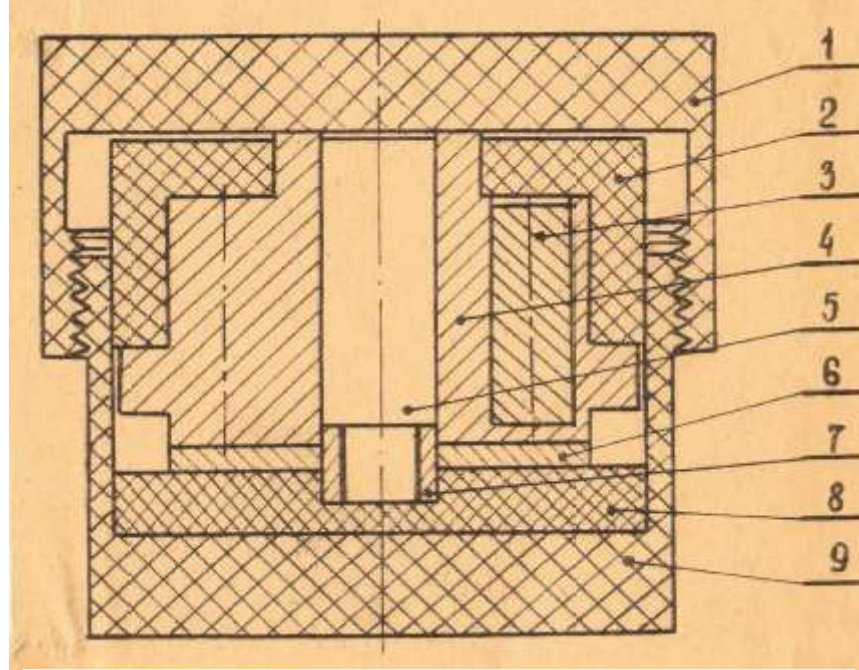
<https://youtu.be/DO1N0BK1i7M>
<https://youtu.be/ucZkSlofrJY>
<https://youtu.be/OHnt12t6xbY>



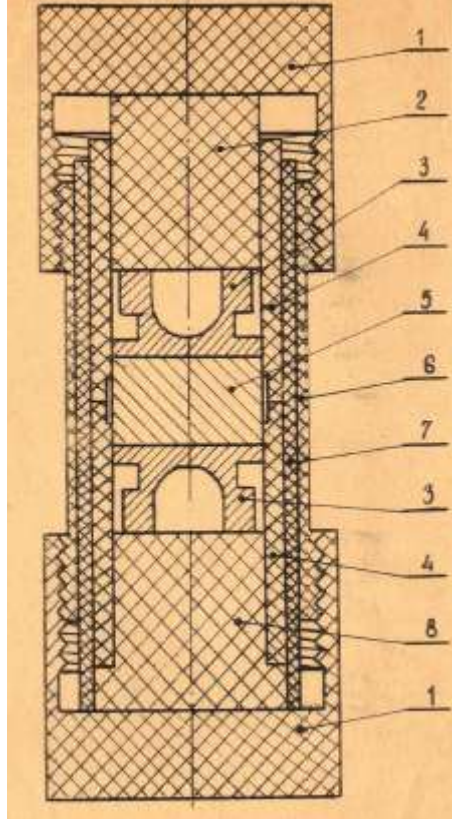
<https://pdt-online.org/273480>



<https://omotorah.ru/diffusion-welding-of-titanium-in-vacuum-parameters-of-diffusion-welding-process-technology/>

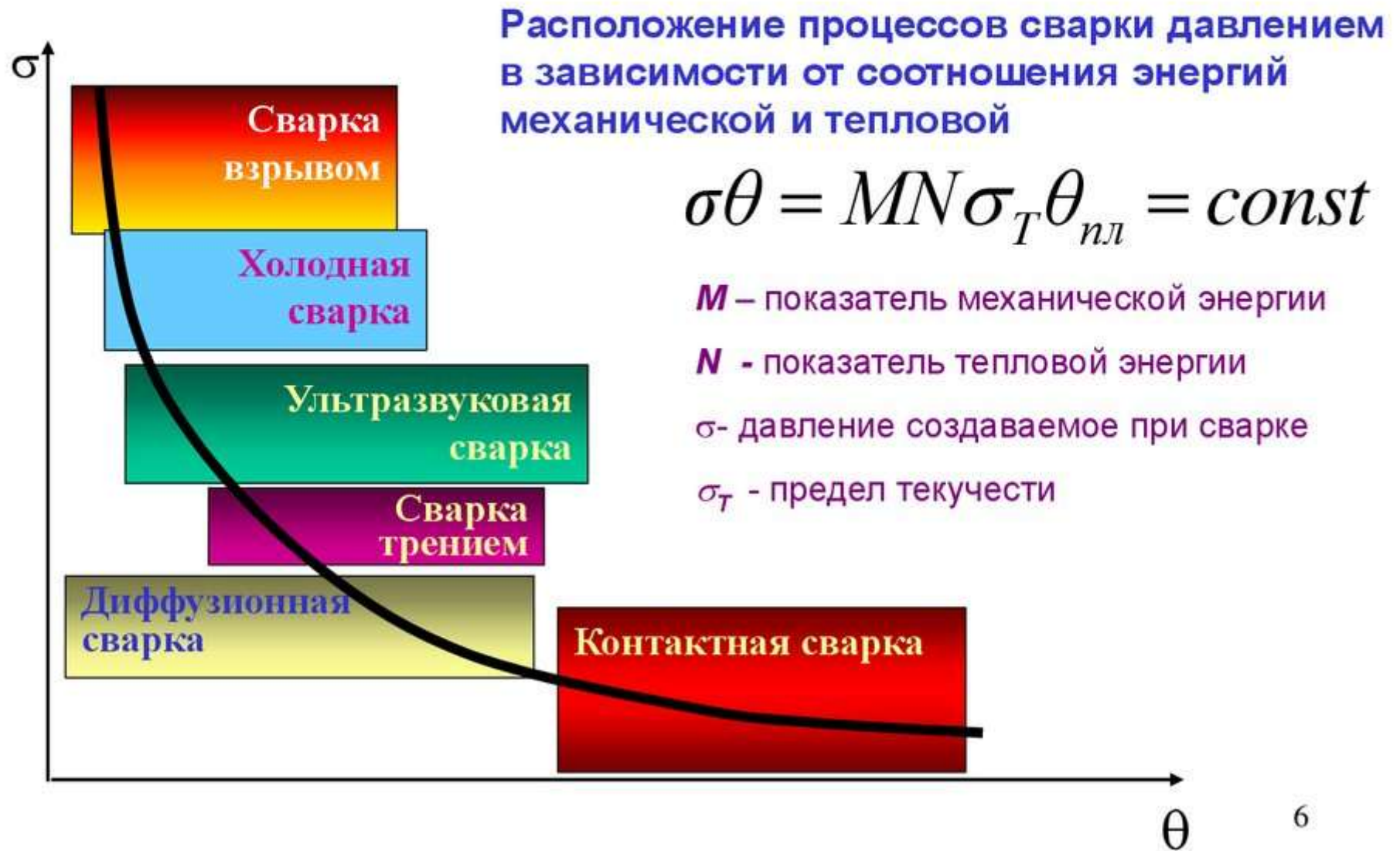


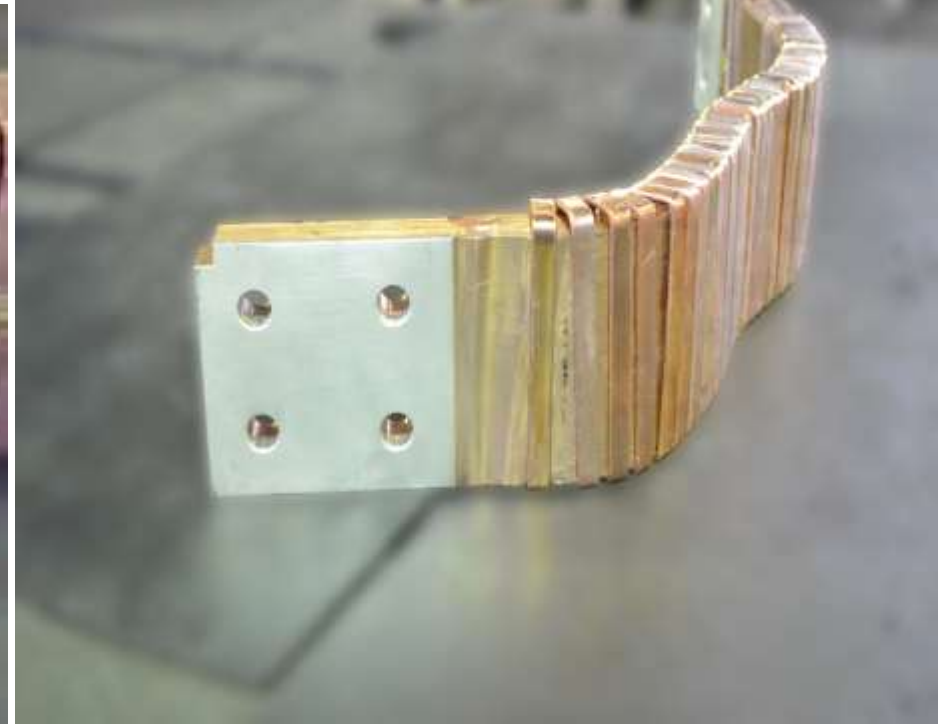
Приспособление для сборки и сварки стыкового соединения блока цилиндров диаметром до 80 мм (1-крышка, 2-вставка, 3-бронзовый стержень, 4-стальной блок цилиндров, 5-графитовый стержень, 6-бронзовый диск, 7-центрирующая втулка, 8-опорный диск, 9-стакан).



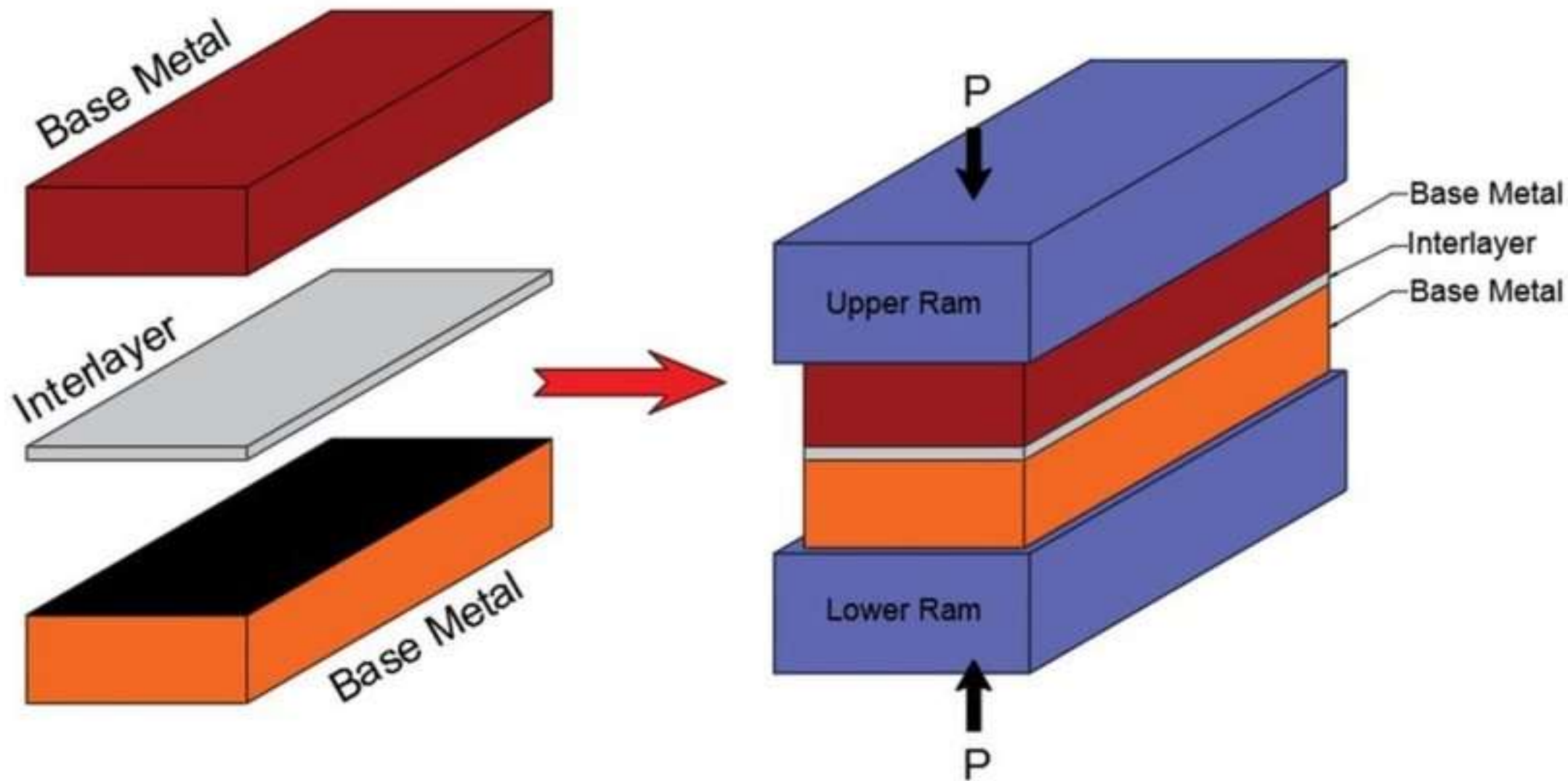
Припособление для сборки и сварки башмаков диаметром до 23 мм (1-крышка, 2-верхний пуансон, 3-стальной башмак, 4-направляющая разрезная втулка, 5-бронза, 6-втулка, 7-промежуточная разрезная втулка, 8-нижний пуансон).

Зависимость между сварочным давлением и температурой нагрева сварного соединения.

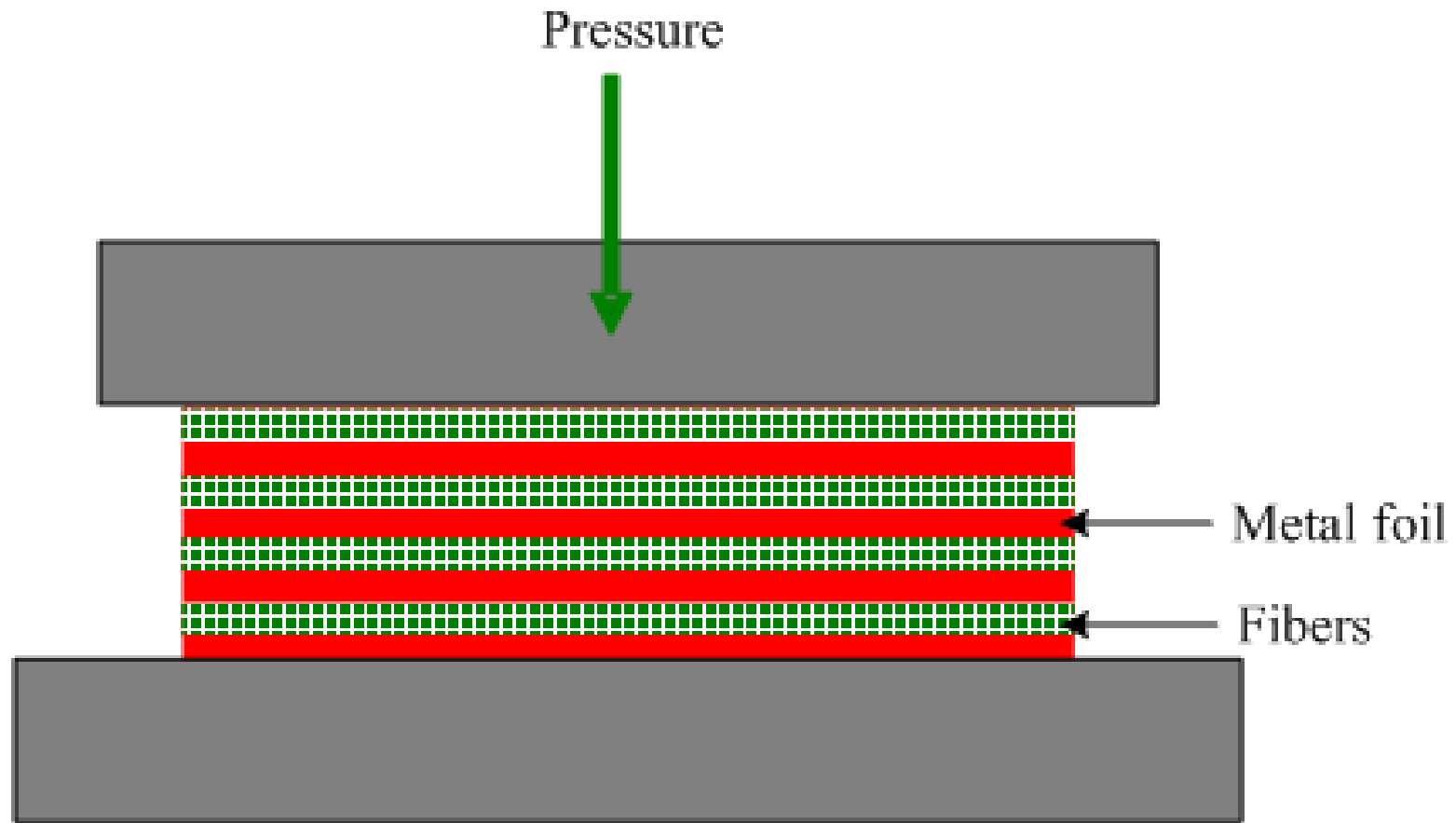




<https://tehnosvar.ru/non-standard-tasks/34/>



Diffusion Bonding



www.substech.com

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metal_joining_technologies_welding_brazing_soldering

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=solid_state_welding_ssw#diffusion_welding_dfw

Diffusion Welding (DFW)

Diffusion Welding is a [Solid State Welding](#) process, in which pressure applied to two work pieces with carefully cleaned surfaces and at an elevated temperature below the melting point of the metals. Bonding of the materials is a result of mutual [diffusion](#) of their interface atoms.

In order to keep the bonded surfaces clean from oxides and other air contaminations, the process is often conducted in vacuum. No appreciable deformation of the work pieces occurs in Diffusion Welding.

Diffusion Welding is often referred more commonly as [Solid State Welding \(SSW\)](#).

Diffusion Welding is able to bond dissimilar metals, which are difficult to weld by other welding processes:

- Steel to tungsten;
- Steel to niobium;
- Stainless steel to titanium;
- Gold to copper alloys.

Diffusion Welding is used in aerospace and rocketry industries, electronics, nuclear applications, manufacturing [composite materials](#).

Advantages of Diffusion Welding:

- Dissimilar materials may be welded ([Metals](#), [Ceramics](#), [Graphite](#), glass);
- Welds of high quality are obtained (no [pores](#), inclusions, chemical [segregation](#), distortions).
- No limitation in the work pieces thickness.

Disadvantages of Diffusion Welding:

- Time consuming process with low productivity;
- Very thorough surface preparation is required prior to welding process;
- The mating surfaces must be precisely fitted to each other;
- Relatively high initial investments in equipment.

10 - Diffusion bonding of metal alloys in aerospace and other applications

Author links open overlay panel **H.-S.Lee** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695323500101>

Korea Aerospace Research Institute, Republic of Korea
Available online 27 March 2014.

Abstract:

[Diffusion bonding](#) is a solid-state bonding process. The metal components being joined undergo only microscopic deformation, and the joining region is homogeneous – without secondary materials or liquid phases. This chapter investigates diffusion bonding of titanium, steel and [copper alloys](#) used in the [fabrication](#) of several [aerospace components](#) with various complex configurations. The result shows that the diffusion-bonding method can be successfully used with blow forming to form near-net-shape aerospace components, including high-pressure tanks for attitude control of [spacecraft](#), a [combustion chamber](#) with copper cooling channels and lightweight structural panels.

10 - Superplastic forming and diffusion bonding of titanium alloys

Author links open overlay panel **M.Jackson** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845697532500108>

University of Sheffield, UK
Available online 27 March 2014.

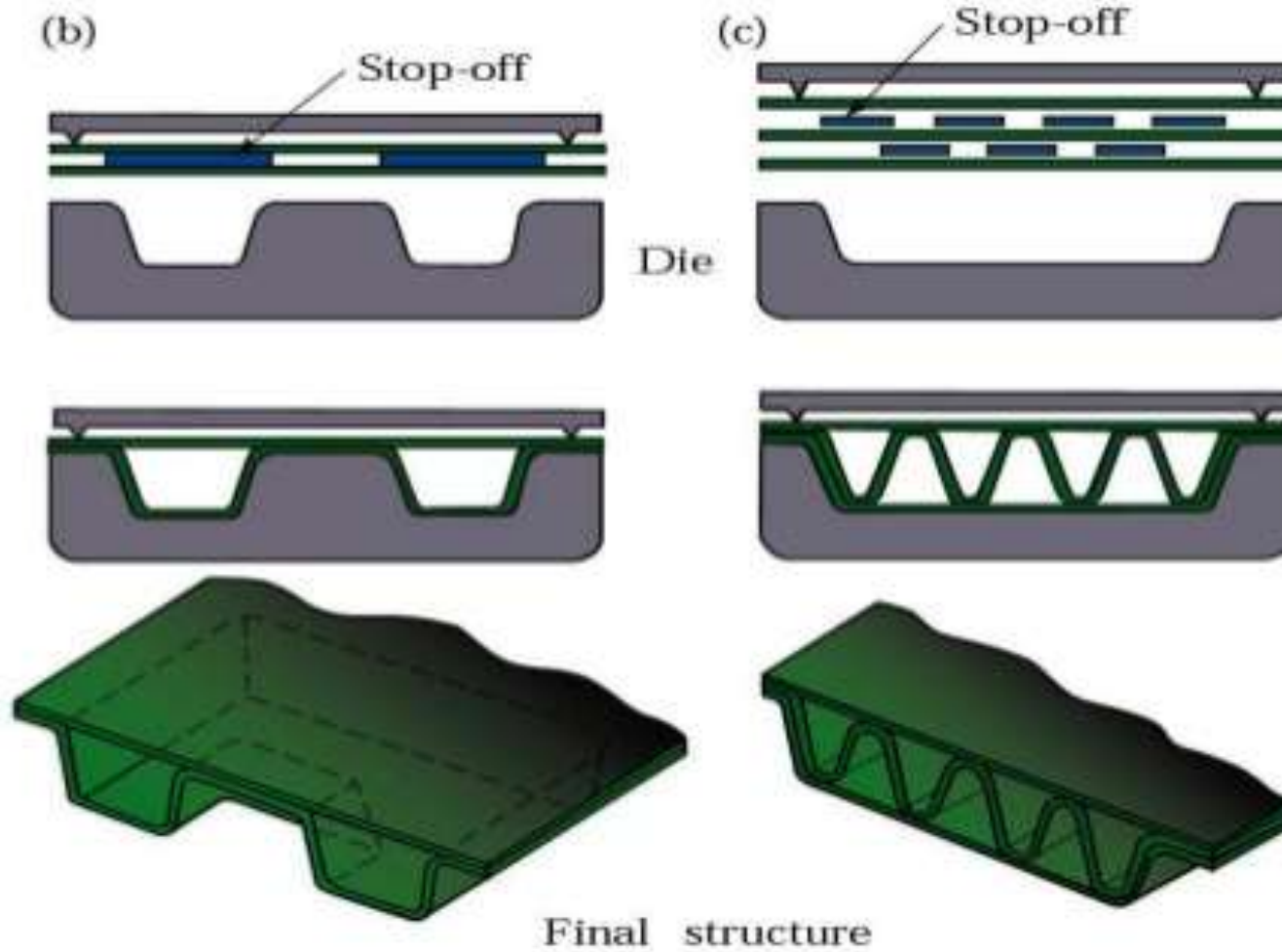
Abstract:

The combination of titanium's excellent mechanical properties coupled with its natural ability to be superplastically formed and diffusion bonded has provided the aerospace industry with opportunities to manufacture stiff lightweight components with fewer joints/welds. This chapter firstly reviews the [metallurgy](#), processing of sheet product and the phenomenon of superplasticity in [titanium](#) alloys. The second part reviews the superplastic forming (SPF) process itself, leading on to the exploitation of SPF coupled with [diffusion bonding](#) for many applications. A critical review of titanium product for low temperature SPF is also provided in this section. The chapter concludes with a brief review of [aerospace applications](#).

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/aerospace-applications>

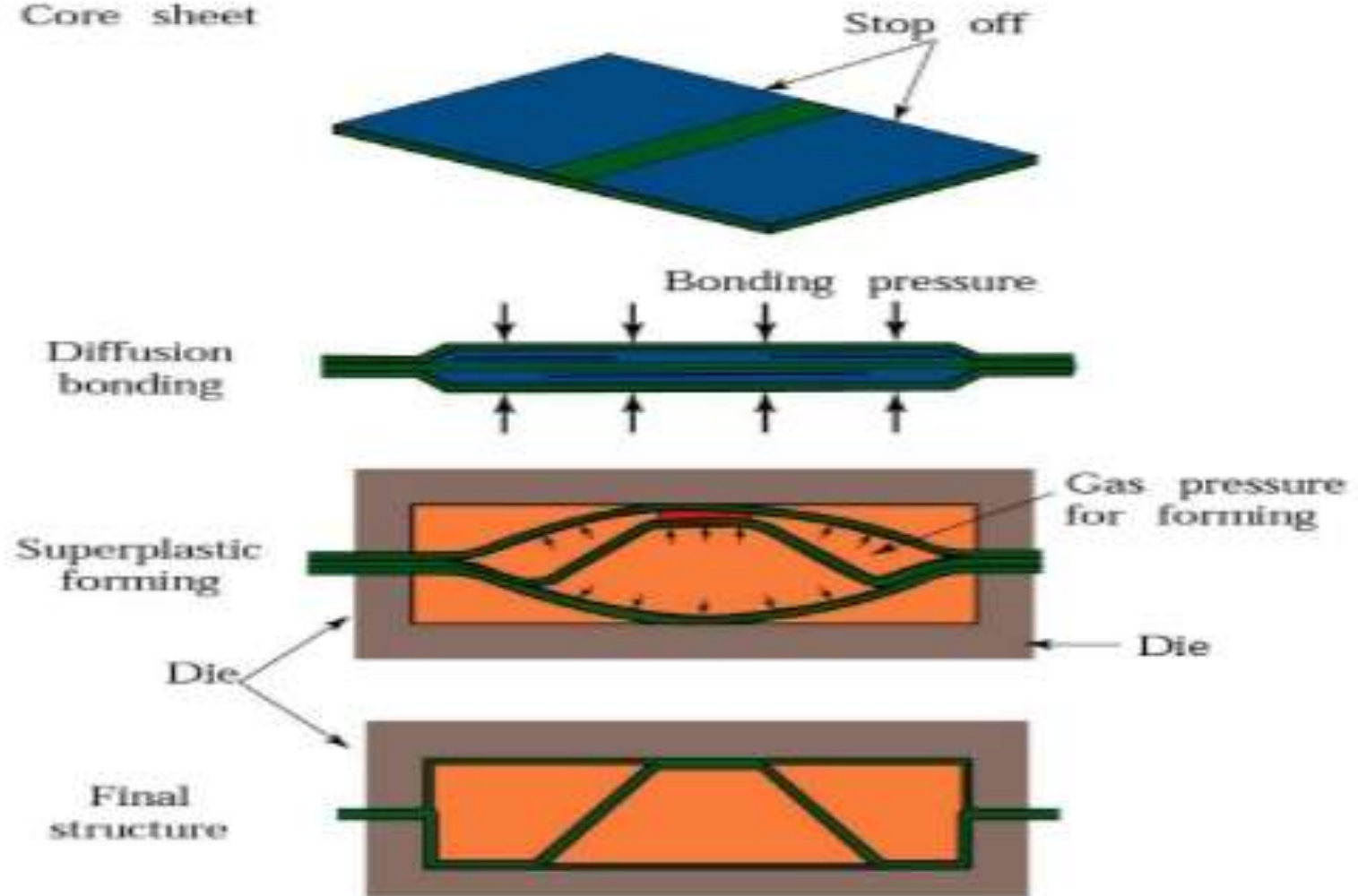
DIFFUSION WELDING IN HYBRID PROCESSES

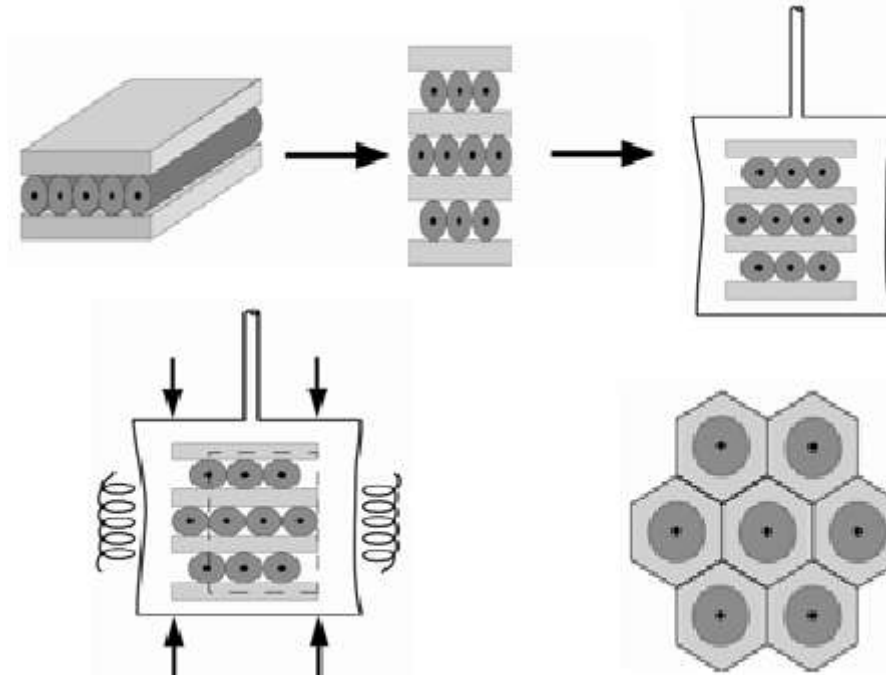
Diffusion Bonding (DFW)



Diffusion Bonding (DFW)

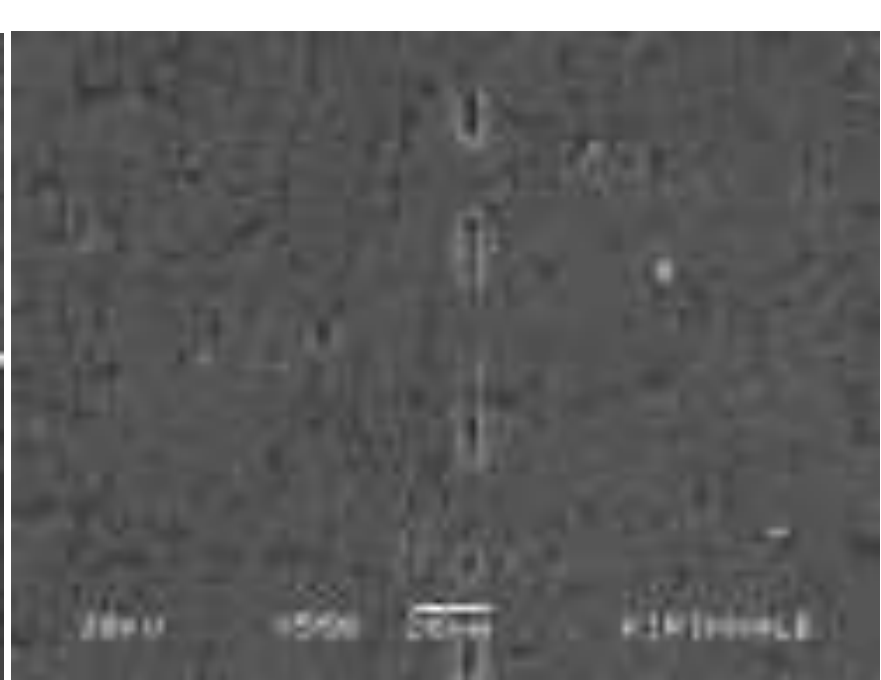
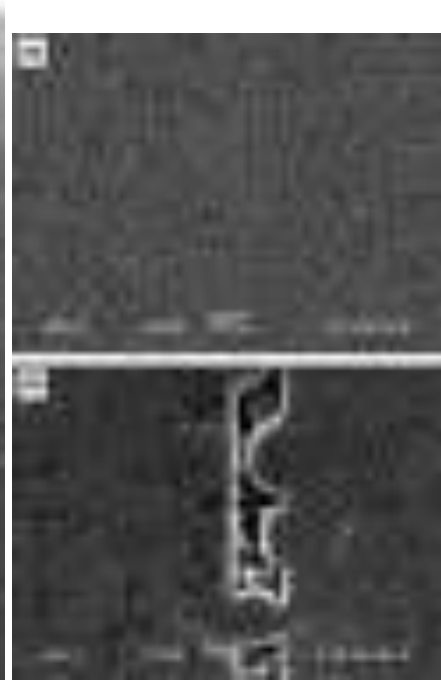
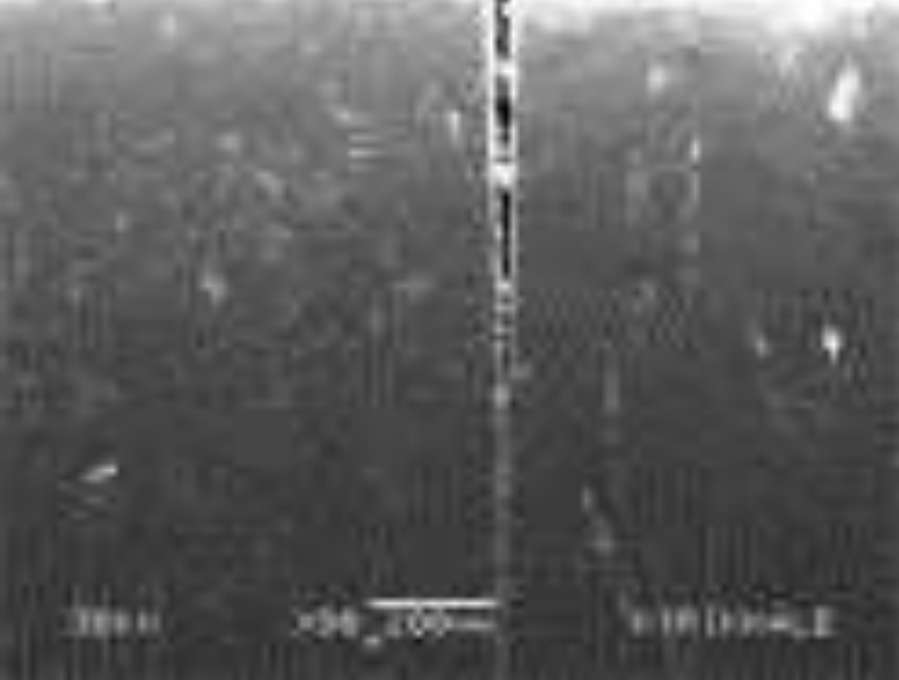
(a) Core sheet





ASSEMBLING TITANIUM AND STEEL PARTS BY DIFFUSION WELDING - diagram, schematic, and image 03

http://www.patentsencyclopedia.com/imgfull/20110176911_03



FRICTION WELDING

Class: Solid State Welding

Energy Source:

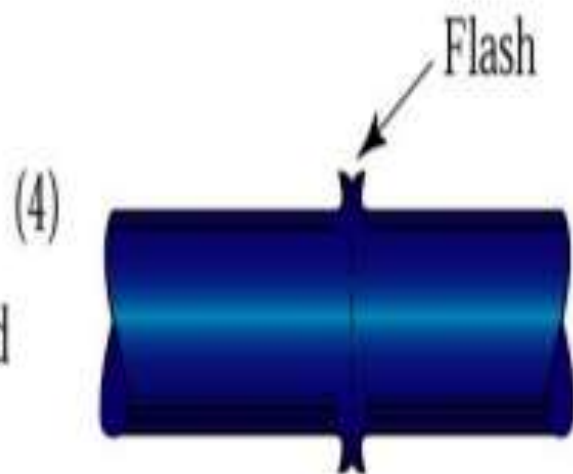
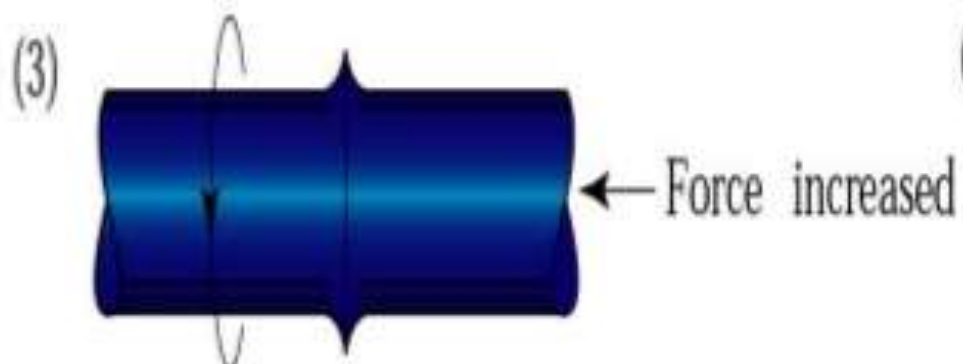
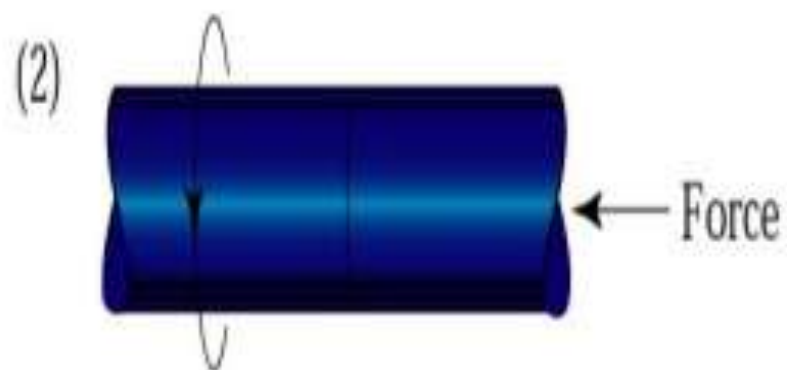
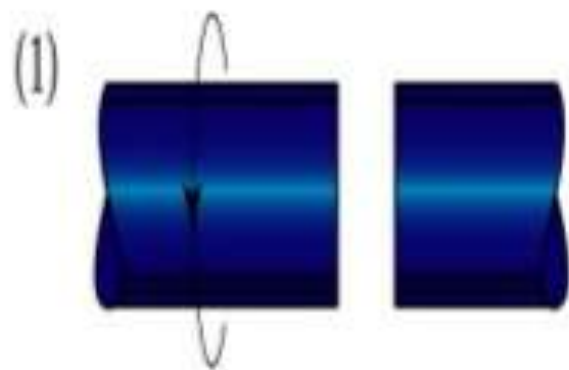
FRICTION WELDING (FRW)

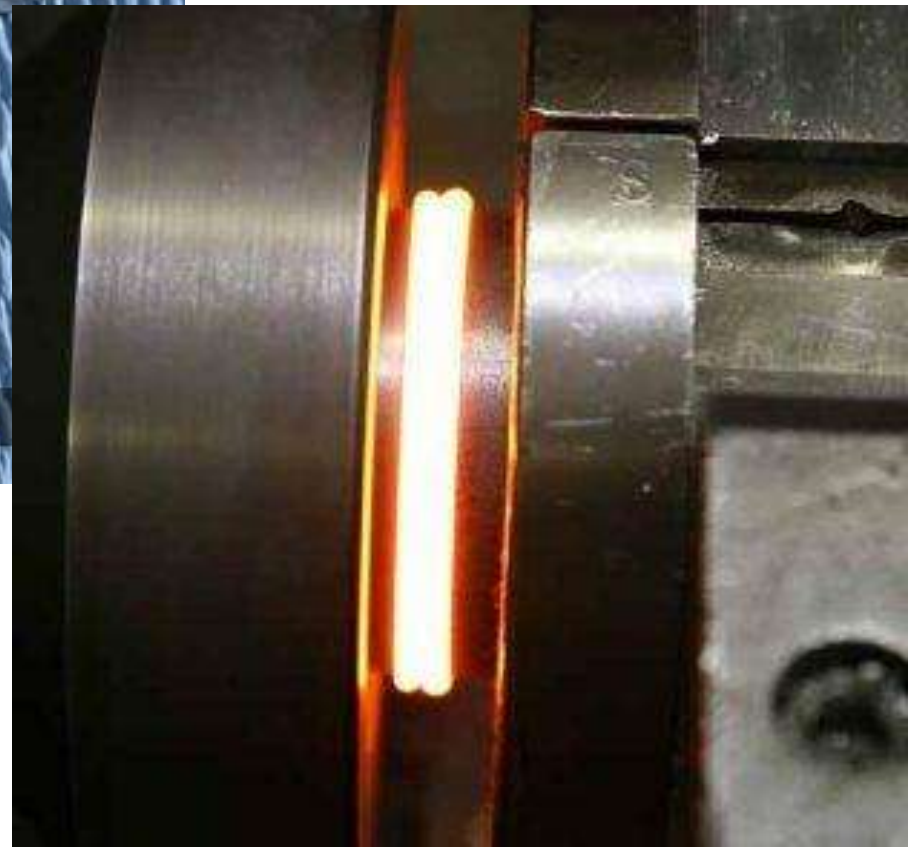
A solid-state welding process producing a weld under the compressive force contact of workpieces rotating or moving relative to one another to produce heat and plastically displace material from the faying surfaces. See Figures B.31(D), B.44, and B.45. See also direct drive friction welding, friction stir welding, and inertia friction welding.

FRICTION STIR WELDING (FSW).

A variation of friction welding producing a weld by the friction heating and plastic material displacement caused by a rapidly rotating tool traversing the weld joint.

Friction Welding (FRW)





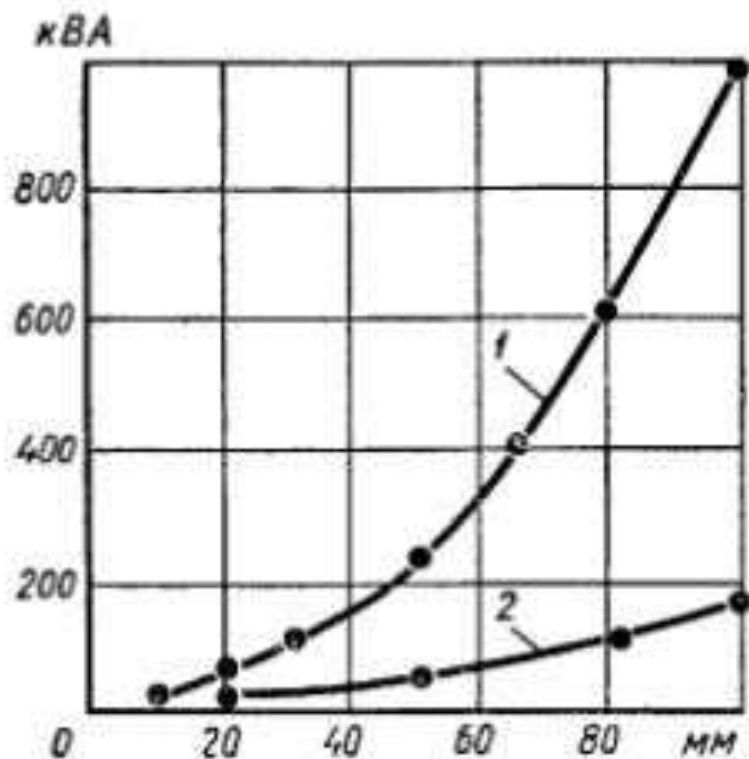


Рис. 37. Мощность, потребляемая из сети, в зависимости от диаметра свариваемых заготовок:

1 — при электрической контактной стыковой сварке; 2 — при сварке трением

autowelding.ru

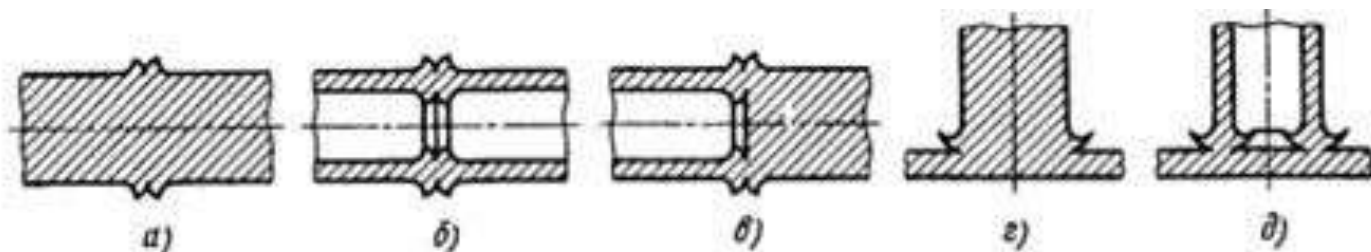


Рис. 39. Типы соединений, выполняемых с помощью сварки трением:

а — стержня встык; б — трубы встык; в — трубы со стержнем встык; г и д — T-образные соединения стержня и трубы с плоской поверхностью контрдетали

autowelding.ru

10. Режимы сварки трением заготовок из стали

Диаметр заготовки, мм	Основные параметры процесса					Дополнительные сведения	
	Частота вращения, об/мин	Осевое усилие, кгс		Время, с		Потребляемая мощность, кВт	Машинное время процесса, с
		Нагрев	Прокатка	Нагрев	Прокатка		
20	1000	1 500	3 000	5—6	1,5	4	6,5—7,5
50	400	10 000	20 000	20	2,0	25	22

autowelding.ru

<http://www.autowelding.ru/index/0-60>

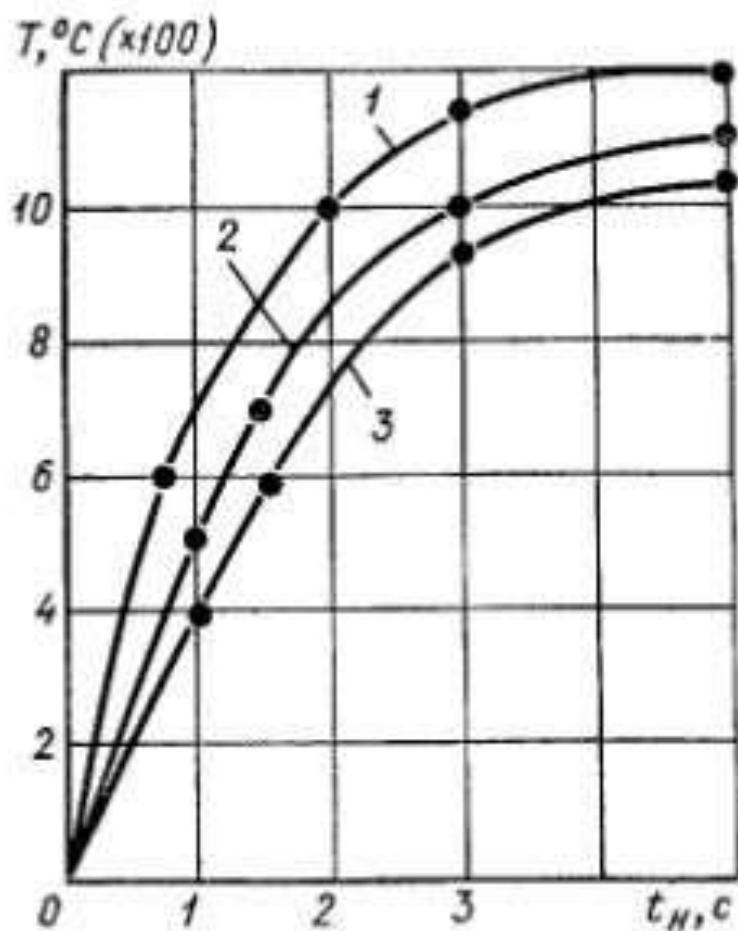


Рис. 42. Изменение во времени температуры в стыке $T^\circ(t)$ в точках поверхности трения, различно удаленных от оси вращения:

1) $\rho = 8,5 \text{ мм}$; 2) $\rho = 5 \text{ мм}$; 3) $\rho = 0$. Режим сварки: стержни из низкоуглеродистой стали, $\varnothing 20 \text{ мм}$, частота вращения 1000 об/мин, давление нагрева 5 кгс/мм^2 .

autowelding.ru

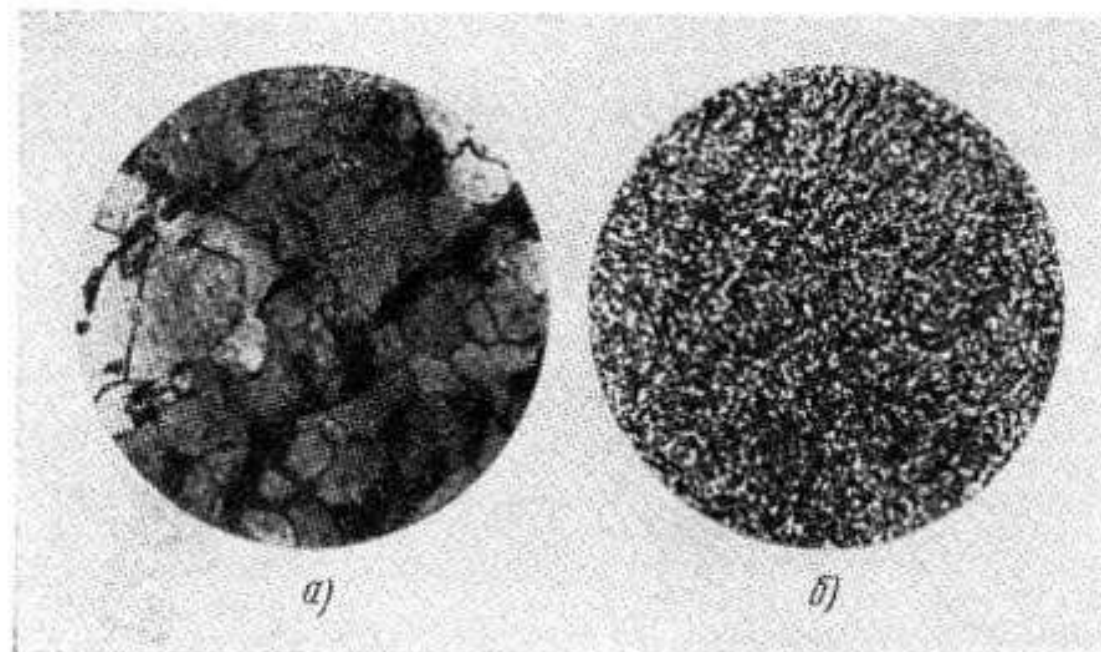


Рис. 38. Микрофотография структуры ($\times 300$):

а — основного металла (низкоуглеродистая сталь); б — металла стыка (сварка трением)

autowelding.ru



Рис. 43. Вилка тяги. Сталь. Сварено трением (поковка + прокат). Диаметр стержня 30 мм

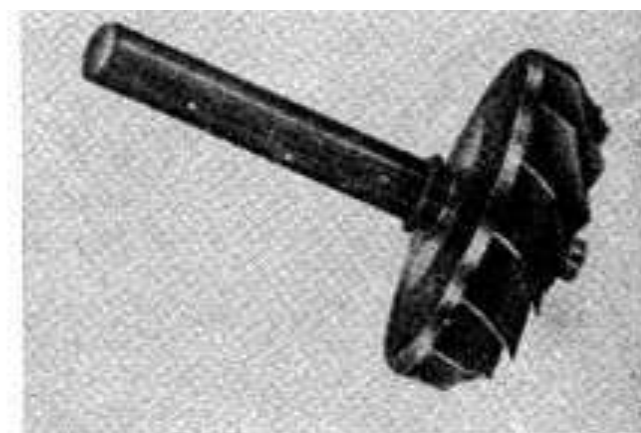


Рис. 44. Ротор турбоагрегата. Сварка трением. Колесо из жаропрочной аустенитной стали, вал — из перлитной стали. Диаметр в месте сварки 20 мм.

autowelding.ru

В 1956 г. токарь-новатор А.М. Чудиков предложил и практически осуществил сварку трением для ряда деталей. В этом виде сварки соединения получают при совместном пластическом деформировании и нагреве деталей. Нагрев происходит в результате трения двух поверхностей сжатых между собой деталей, то есть механическая энергия преобразуется в тепловую.

Наибольшее распространение получила схема сварки, когда нагрев трением осуществляется в контакте между деталями, одна из которых вращается относительно другой. Возникающее при вращении трение, а также пластическое деформирование вызывают разрушение окисных и адсорбированных пленок и удаление их и других посторонних включений из зоны сварки. Такая очистка позволяет в процессе пластической деформации обеспечить надежную металлическую связь по всей поверхности свариваемых деталей и получить высокопрочное соединение.

В процессе нагрева трением различают **три стадии**.

Первая стадия представляет собой приработку трущихся поверхностей, когда сминаются выступы, разрушаются пленки, обеспечивается металлический контакт по всей поверхности стыка свариваемых деталей. В конце первой стадии момент сил трения уменьшается до минимума.

С началом **второй стадии** возникают отдельные очаги металлической связи (очаги схватывания), которые постепенно расширяются, но по мере перемещения трущихся поверхностей относительно друг друга разрушаются.

На этой стадии момент трения постоянно нарастает до максимума и происходит интенсивный нагрев торцов.

Для **третьей стадии** характерно падение момента сил трения, так как с повышением температуры металла очаги схватывания легко разрушаются и прочность металла уменьшается. При нагреве торцов деталей до пластического состояния ($T_{п} = 0.7...0.9 T_{пл}$) момент сил трения стабилизируется и в дальнейшем не меняется. В результате температура по сечению стыка выравнивается и металл деталей оказывается подготовленным к образованию сварного соединения. Вращение детали практически мгновенно прекращается и детали сжимаются с усилием проковки, которое обычно в два раза больше усилия при нагреве.

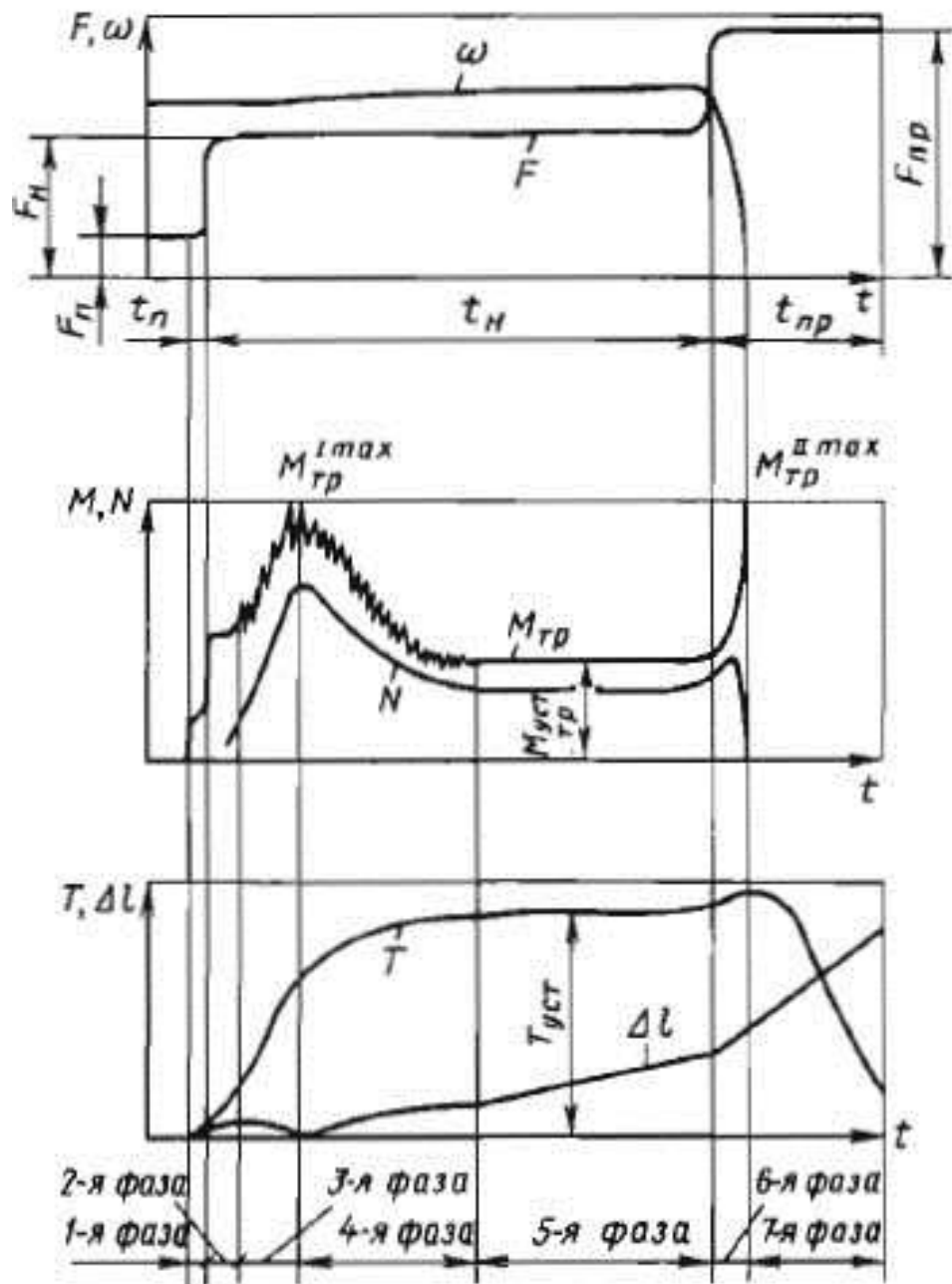
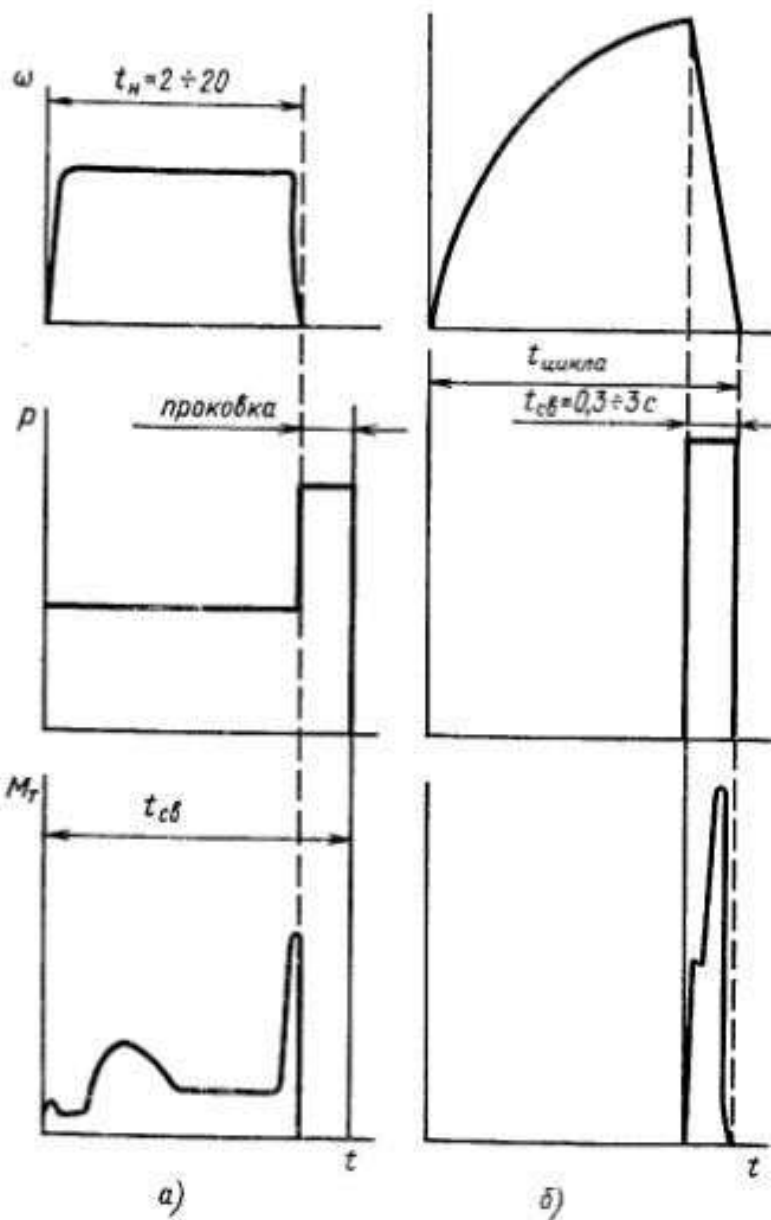


Рис. 47. Циклограммы процесса сварки трением:
 а — обычной; б — инерционной

Схема типовых осциллограмм основных параметров режима сварки трением: F - осевая прижимающая нагрузка, Н; (ω - частота вращения, с-1; N - мощность тепловыделения, Вт; Mтр - момент трения, Н . м; tп , tн, tпр - соответственно время притирки, нагрева и проковки, с; T - температура в зоне соединения, °С ; Δl- осадка, мм.

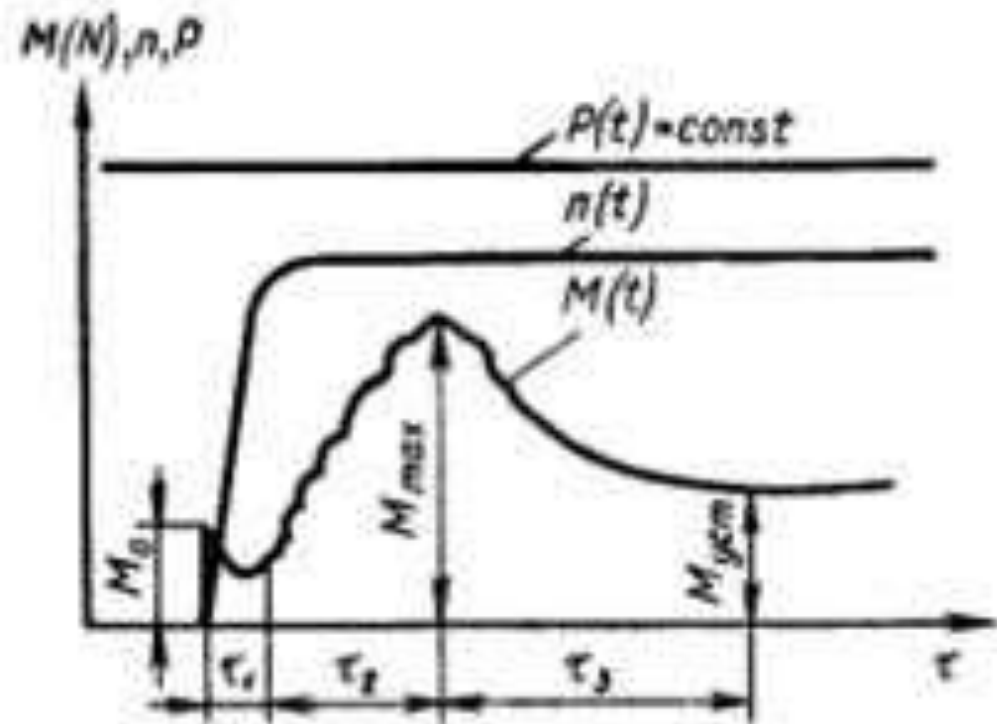


Рис. 40. Изменение момента сил $M(t)$ в процессе сварки трением

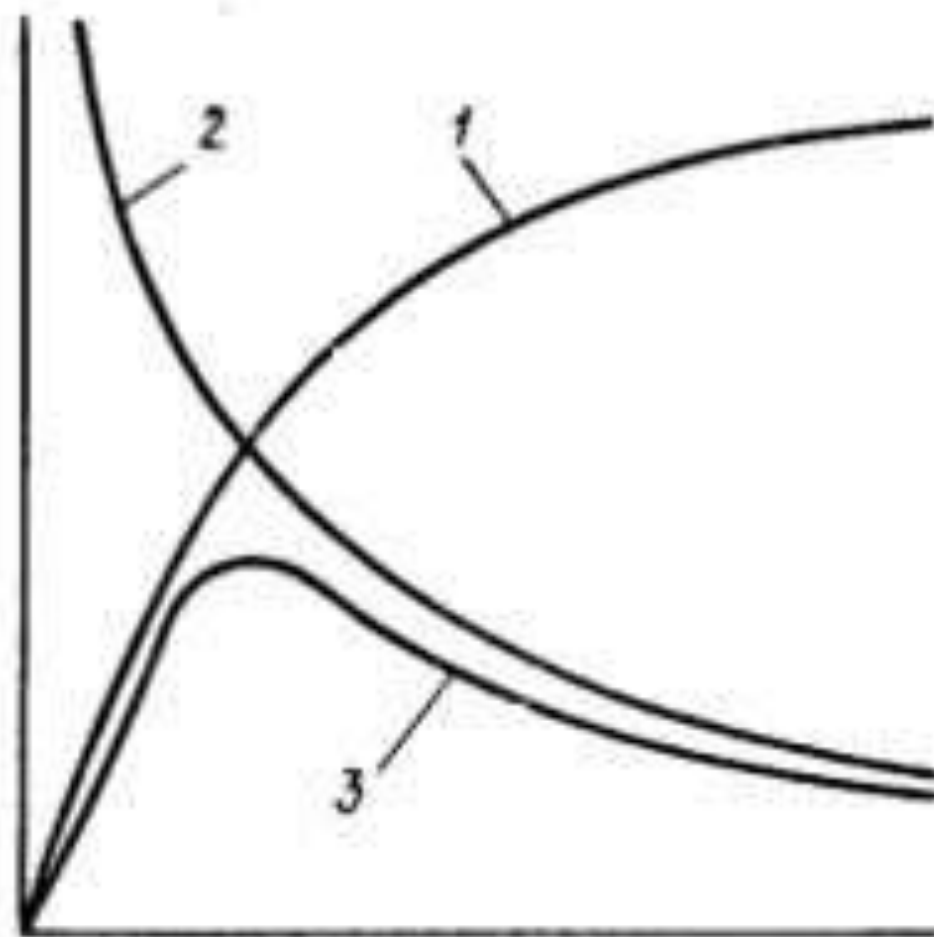


Рис. 41. Максимум кривой моментов (3), как результат нарастания числа «схватываний» 1 и спада 2 прочности «мостиков» в связи с ростом температуры

autowelding.ru

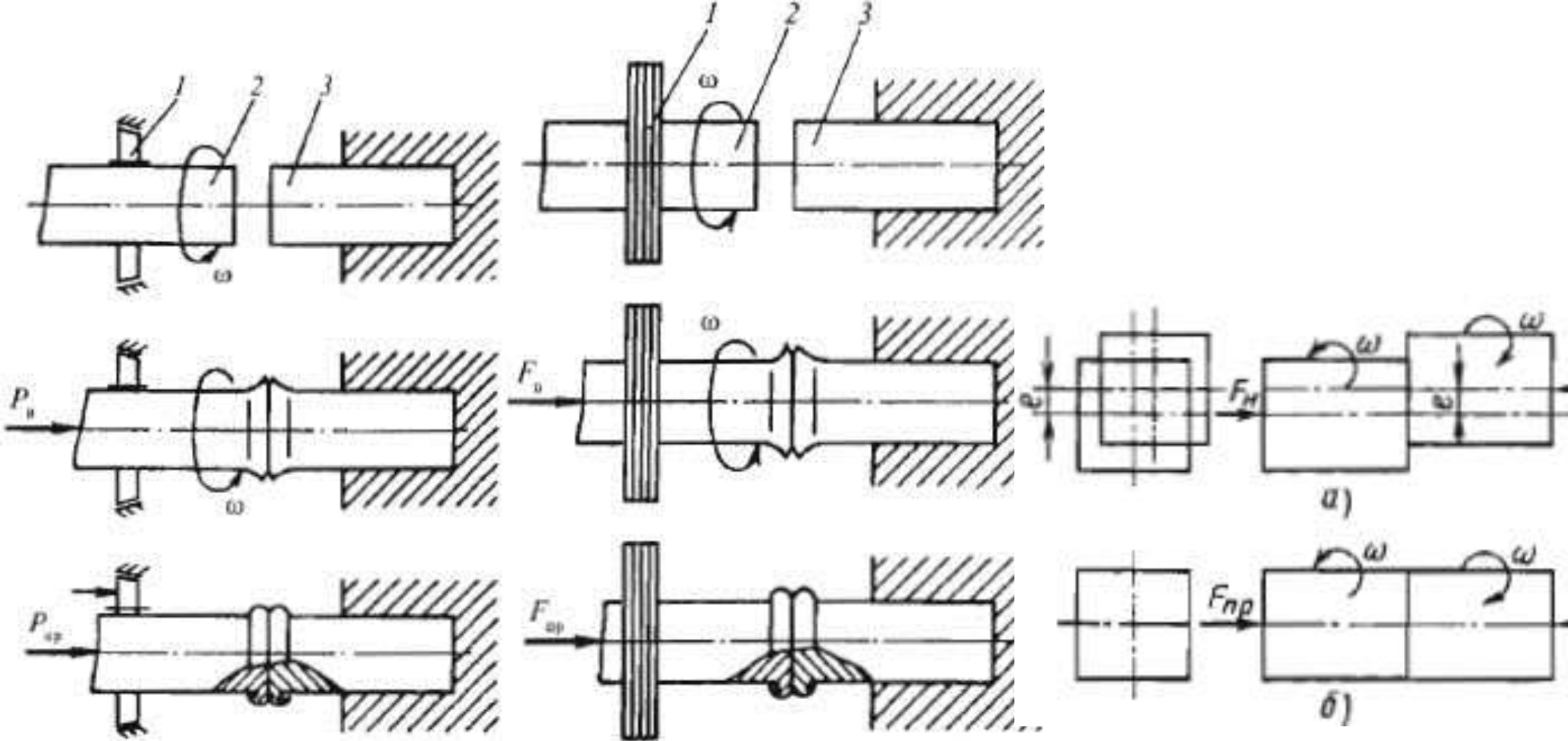


Схема сварки трением с непрерывным перемещиванием: 1 - тормоз; 2, 3 - свариваемые заготовки.

Схема инерционной сварки трением: 1 - маховик; 2, 3 - свариваемые элементы.

Схема орбитальной сварки трением: а - стадия нагрева; б - стадия проковки.

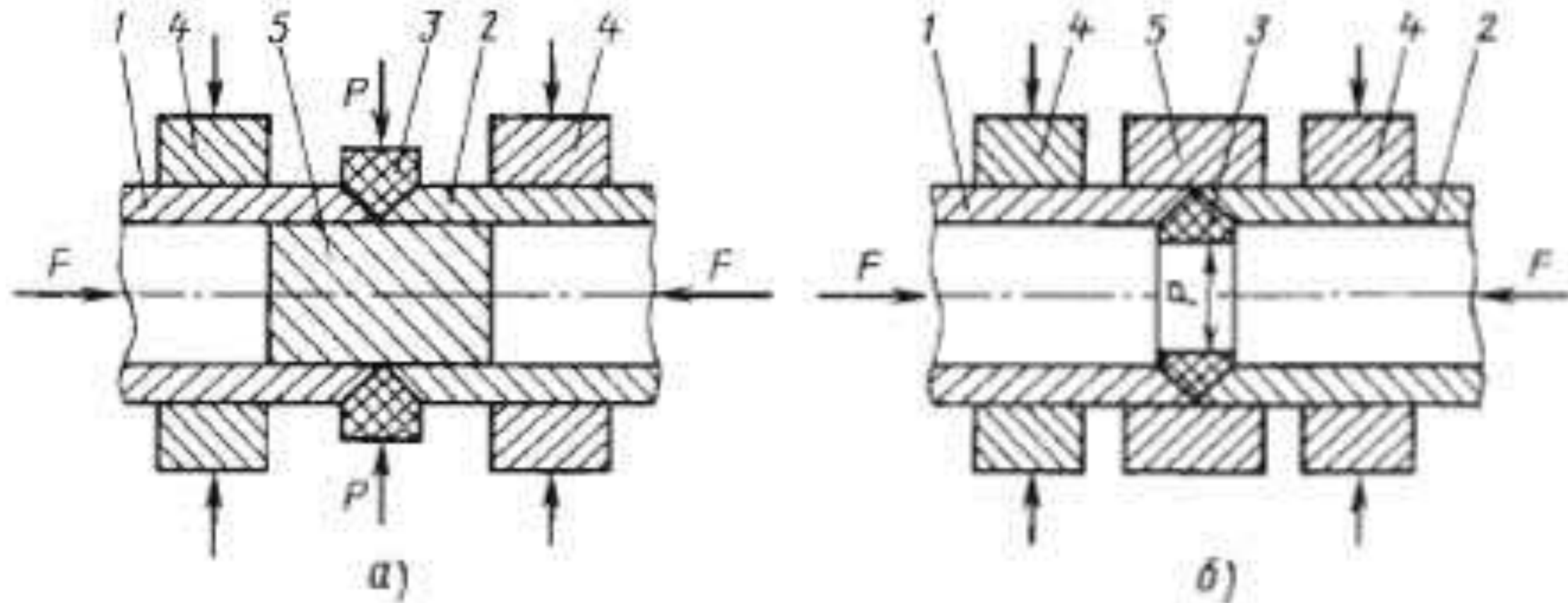


Схема радиальной сварки трением:

а - с наружным разжимным кольцом :

б - с внутренним разжимным кольцом:

1. 2 - свариваемые заготовки; 3 - вращающееся кольцо из присадочного материала; 4 – зажимные элементы; 5 – оправка.



Рис. 49. Разновидности процесса сварки трением:

а, б — сварка с помощью вращения третьего тела;
 в — одновременная сварка трех деталей на машине с двумя шпинделями; г — вибрационная сварка

autowelding.ru

Таблица 1. Некоторые режимы сварки трением.

Материал	Диаметр заготовки, мм	Частота вращения, с ⁻¹	Давление, МПа		Суммарная осадка, мм	Время нагрева, с
			нагрева	проковки		
Ст3	40	16,6	100	100	12	20
Сталь 35	30	21	35	70	7	30
25Г2С	22	25	45	45	4	10
1Х18Н9Т	18	16,6	70	170	5	8
9ХС	30		100	200	5	15
Р18 + 40Х	18				2,2	9
АД1 + Ст3	40	12,5	50	120	14	4
Ст3 + медь М1	20	25	35	70	12	7,5

<http://weldzone.info/technology/ets/882-rezhimy-svarki-treniem>

<https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/svarka-treniem.html>

Технологические параметры некоторых, наиболее распространенных машин отечественного производства, на которых выполняется соединение изделий трением, приведены в таблице <https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/svarka-treniem.html>

В условиях ремонтных мастерских, а также в быту, под сварку трением можно успешно приспособлять обычные токарные станки. Предварительно следует произвести расчет допустимого осевого усилия на шпиндель и соотнести полученное значение с требуемым. <https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/svarka-treniem.html>

МСТ-51	МСТ-41	МФ-341	МФ-327	МФ-346	Характеристика
75	40	20	10	4	Мощность, кВт
200	100	30	25	30	Усилие осевого сжатия заготовок, кН
70	45	35	22	50	Наибольший диаметр соединяемых изделий, мм
Не ограничивается		350	200	45	Наибольшая длина подвижной (вращающейся) заготовки, мм
25-50	20-40	15-45	10-30	10-20	Время выполнения полного цикла соединения, с
До 80	До 100	До 120	До 150	До 180	Производительность, циклов в час
60	50	50	45	45	Давление воздуха пневмоцилиндре механизма прижима, кПа

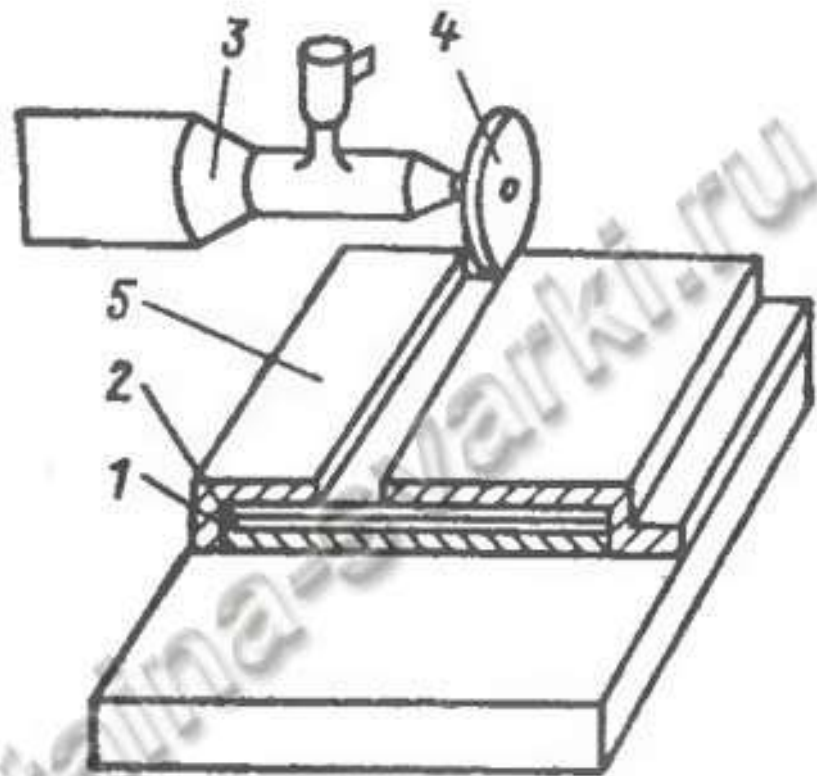


Схема роликовой СТ:

1, 2 — свариваемые заготовки; 3 — шпиндель; 4 — вращающийся ролик; 5 — прижимы

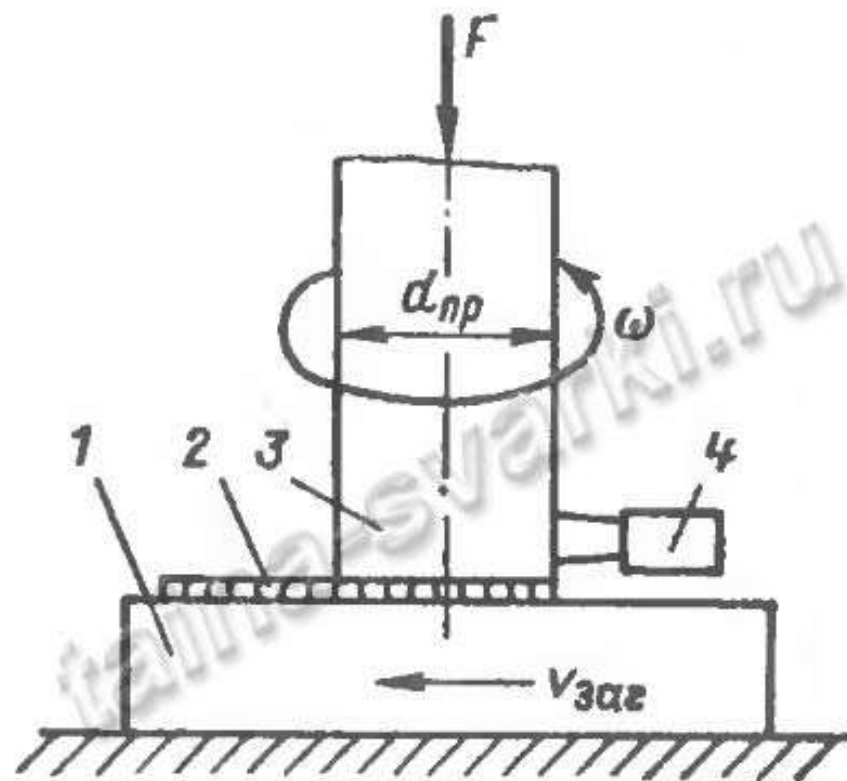


Схема наплавки трением:

1 — наплавляемая поверхность; 2 — слой наплавленного металла; 3 — пруток; 4 — резец для снятия грата

Роликовая сварка трением

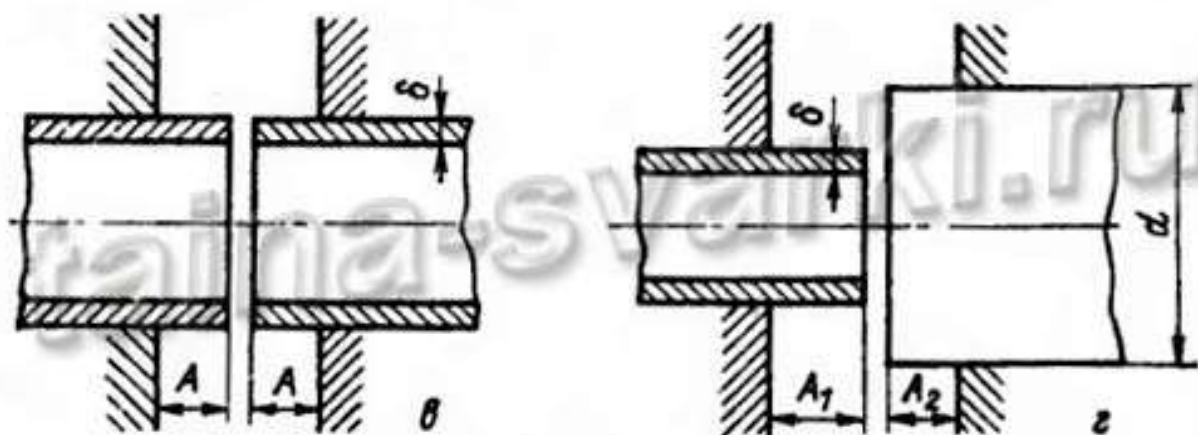
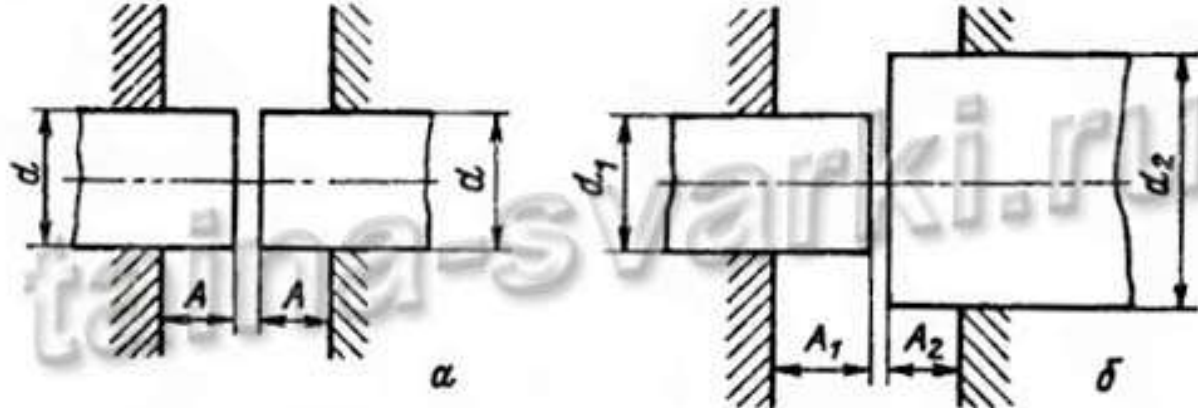
Этот вид сварки используют в тех случаях, когда нужно сварить тонколистовые элементы. Схема роликовой сварки приведена на рисунке.

Суть этого способа состоит в том, что ролик, вращающийся со скоростью, примерно, 1600 рад/с, подводит в края заготовок. Ролик перемещается относительно свариваемых кромок со скоростью 0,1-2,0 м/с, а давление, создаваемое на ролик, составляет в диапазоне 0,2-0,5 МПа.

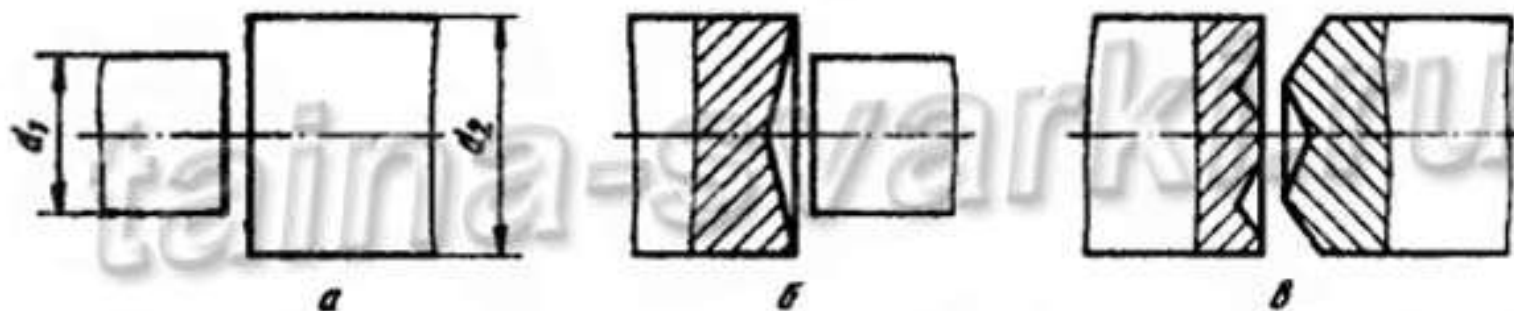
СВАРИВАЕМОСТЬ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

	Алюминий	Алюминиевые сплавы	Латунь	Бронза	Оксид кадмия	Литейный чугун	Керамика	Кобальт	Медь	Медноникелевый сплав	Спеченное железо	Инвар	Свинец	Магний	Магниевые сплавы	Молибден	Манель	Никель	Никелиевые сплавы	Нимоник	Ниобий	Никобиевые сплавы	Серебро	Серебряные сплавы	Углеродистая сталь	Легированная сталь	Мартенситно-стабилизирующая сталь	Нержавеющая сталь	Тантал	Торий	Титан	Вольфрам	Сверхтвердые материалы (карбид вольфрама)	Уран	Ванадий	Циркониевые сплавы		
Алюминий	■																																					
Алюминиевые сплавы	■	■																																				
Латунь	■		■																																			
Бронза	■																																					
Оксид кадмия	■																																					
Литейный чугун	■																																					
Керамика	■																																					
Кобальт	■							■																														
Медь	■																																					
Медноникелевый сплав	■																																					
Спеченное железо	■																																					
Инвар	■																																					
Свинец	■																																					
Магний	■	■																																				
Магниевые сплавы	■	■																																				
Молибден	■																																					
Манель	■																																					
Никель	■																																					
Никелиевые сплавы	■																																					
Нимоник	■																																					
Ниобий	■																																					
Никобиевые сплавы	■																																					
Серебро	■																																					
Серебряные сплавы	■																																					
Углеродистая сталь	■																																					
Легированная сталь	■																																					
Мартенситно-стабилизирующая сталь	■																																					
Нержавеющая сталь	■																																					
Тантал	■																																					
Торий	■																																					
Титан	■																																					
Вольфрам	■																																					
Сверхтвердые материалы (карбид вольфрама)	■																																					
Уран	■																																					
Ванадий	■																																					
Циркониевые сплавы	■																																					

Примечание: ■ качественные соединения; ▨ некачественные соединения;
□ данные отсутствуют; ⊗ СТ невозможна.



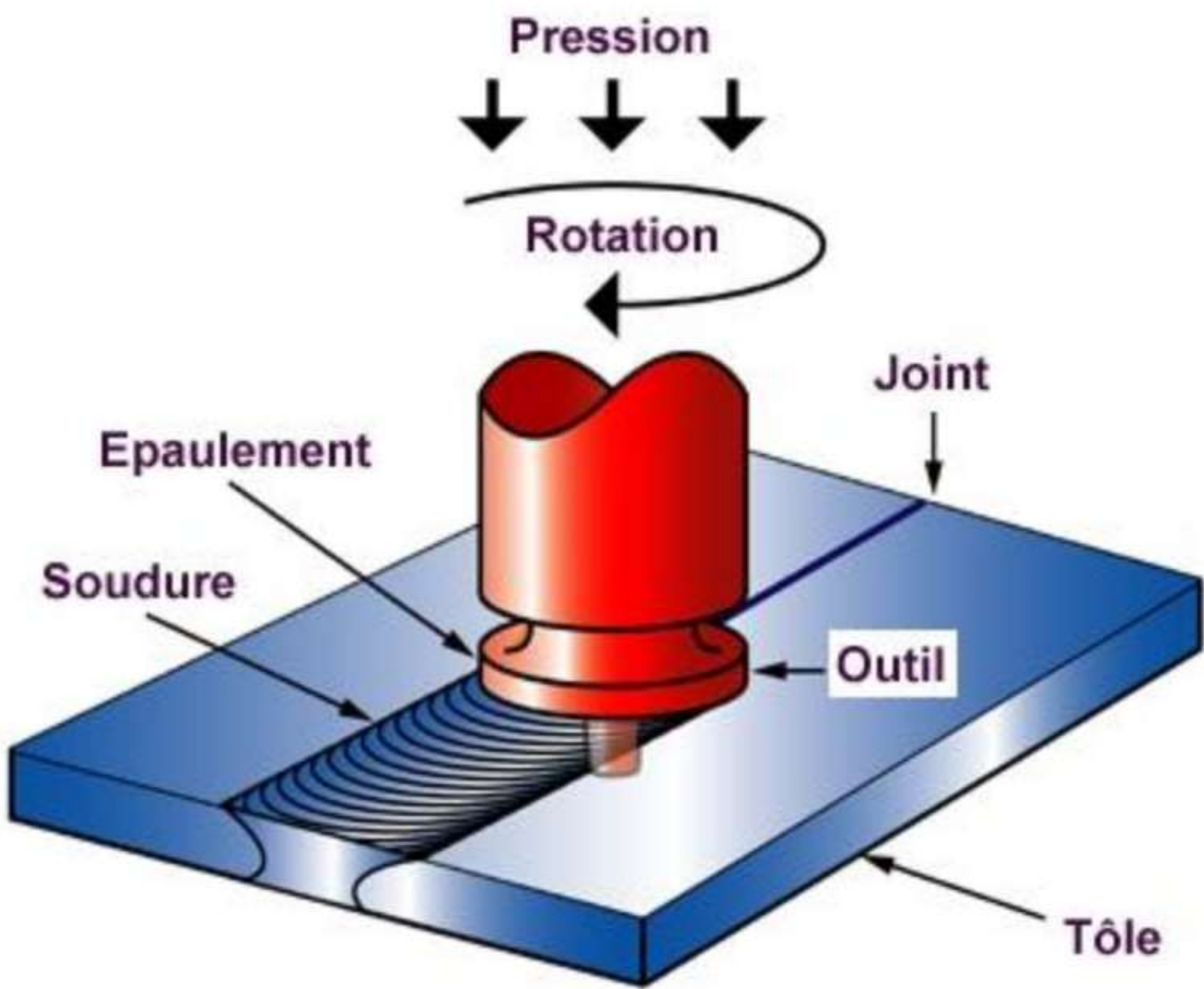
Определение длины вылета заготовок из зажимных устройств:
 а — $A = (0,3 + 1,5)d$; б — $A_1 = (0,3 + 1,5)d_1$; $A_2 = (0,3 + 1,5)d_2$; в — $A = (2 + 4)\delta$;
 г — $A_1 = (2 + 4)\delta$; $A_2 = (0,3 + 1,5)d$

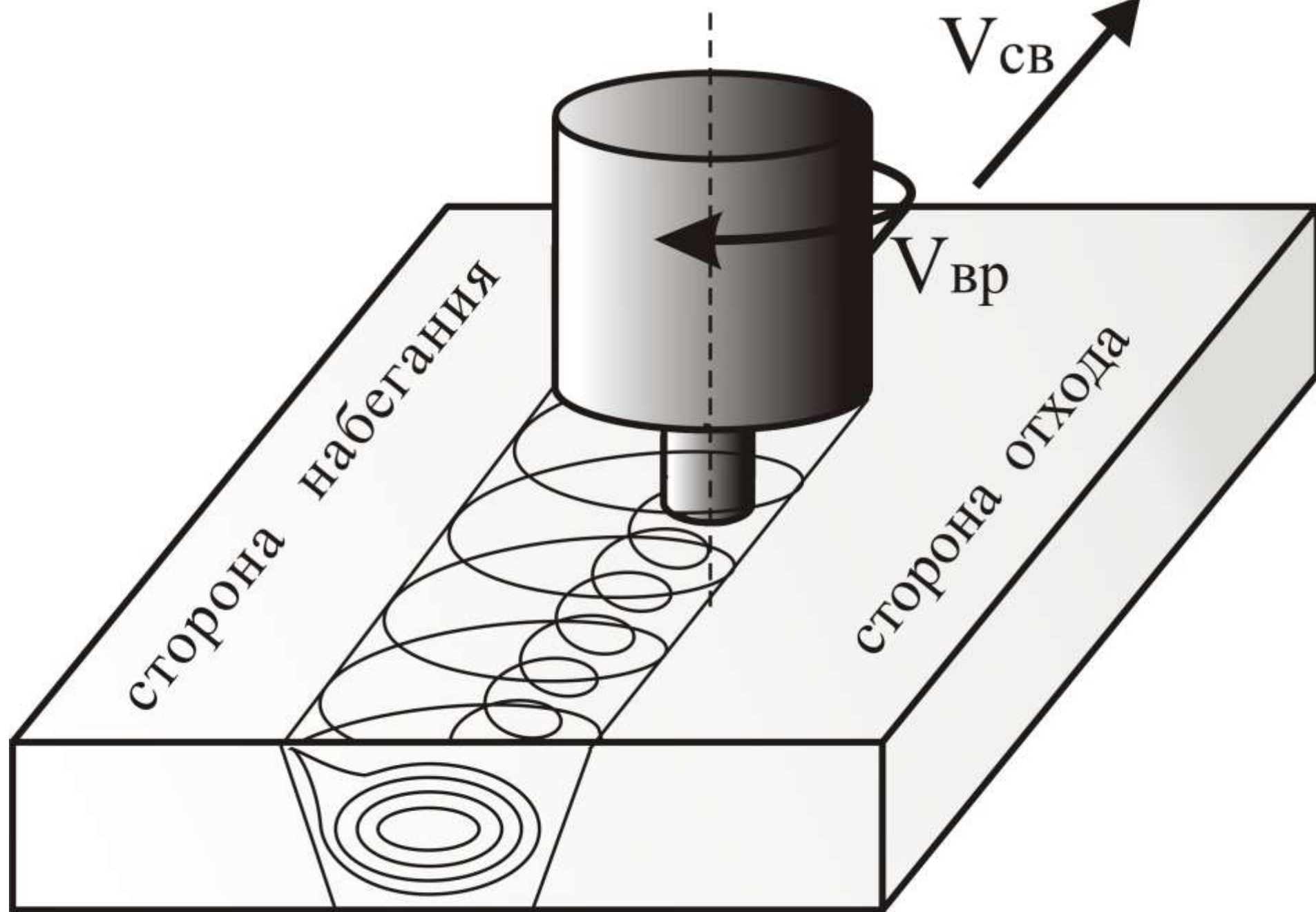


Подготовка контактных поверхностей заготовок из разнородных материалов к сварке:

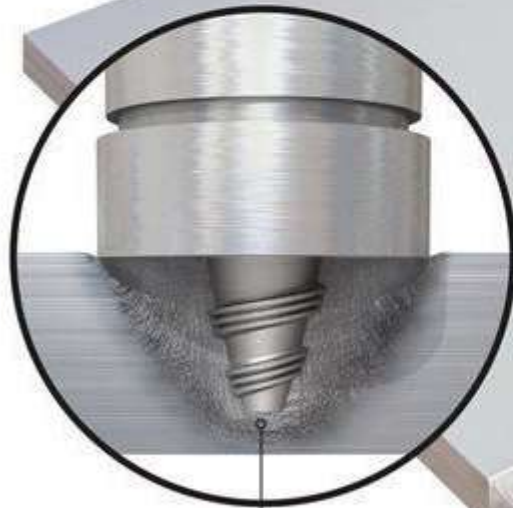
а — быстрорежущая сталь — конструкционная сталь; б — коррозионностойкая сталь — алюминий; в — коррозионностойкая сталь — цинк; $d_2 = (1,15 + 1,25)d_1$





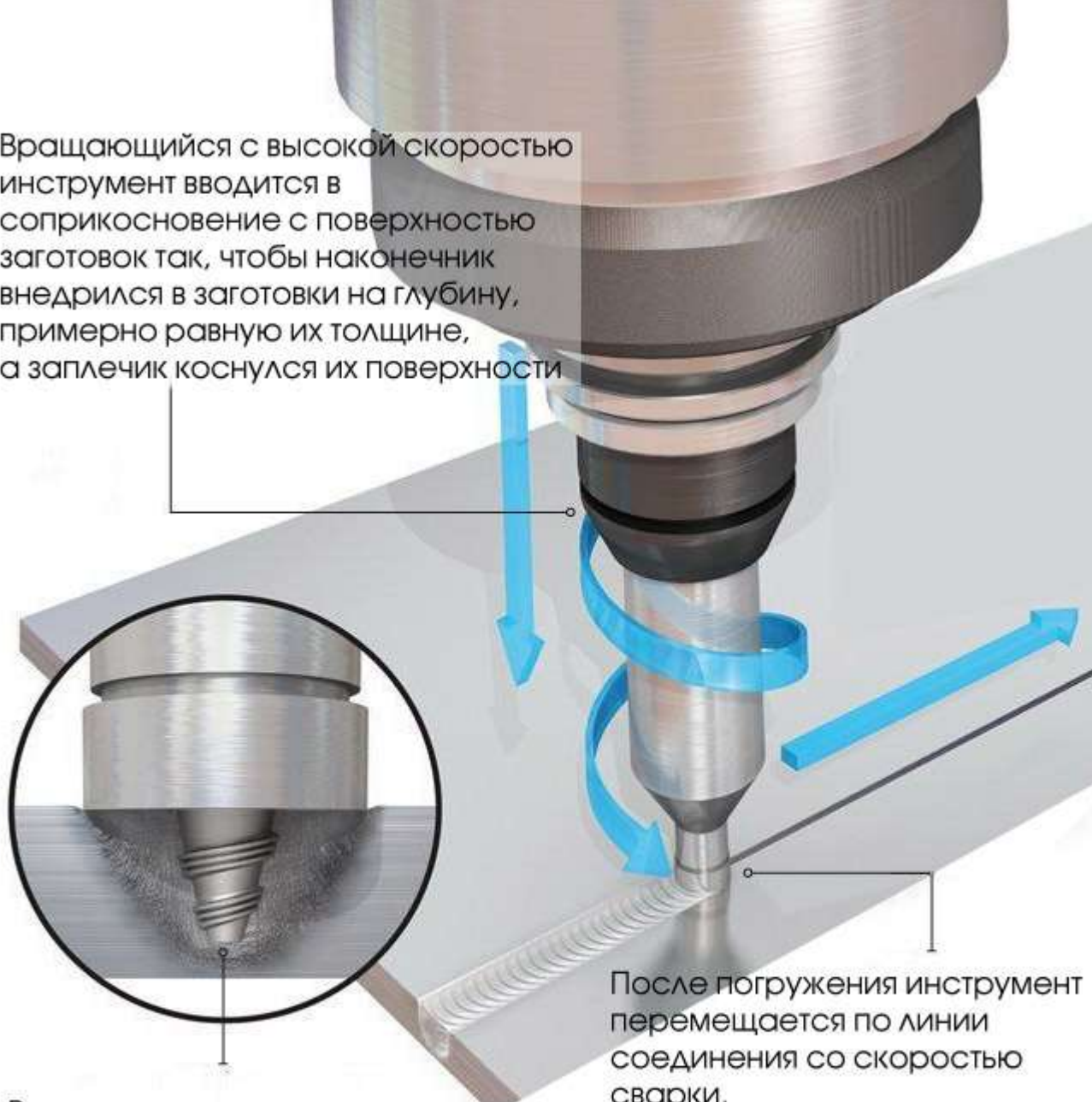


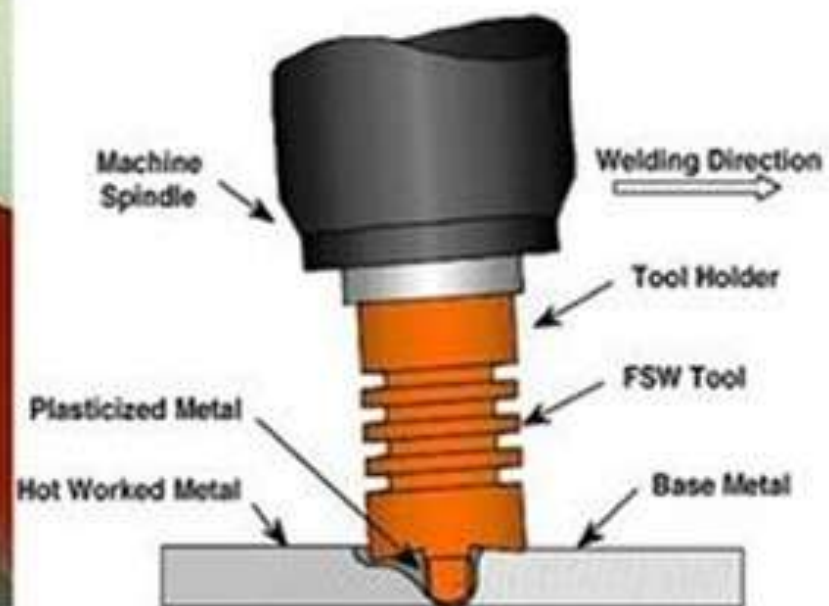
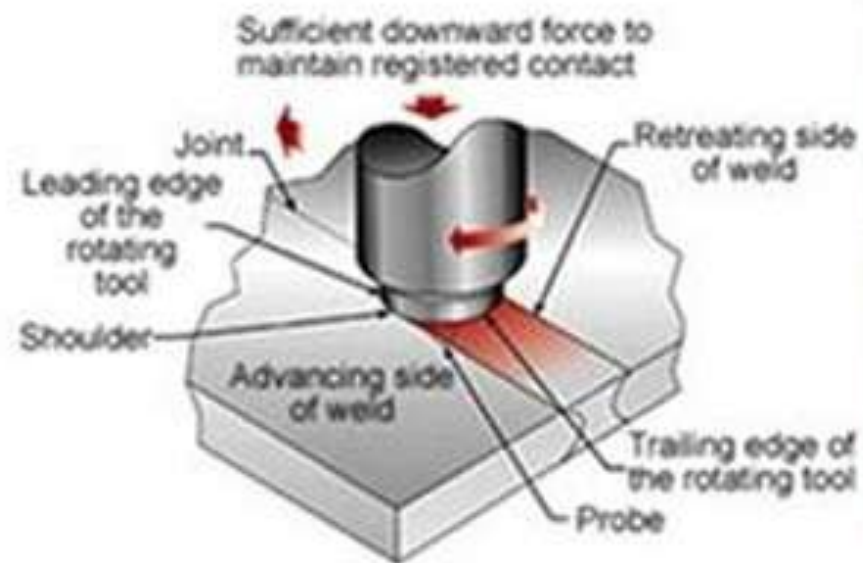
Вращающийся с высокой скоростью инструмент вводится в соприкосновение с поверхностью заготовок так, чтобы наконечник внедрился в заготовки на глубину, примерно равную их толщине, а заплечик коснулся их поверхности



В результате трения происходит нагрев металла до пластического состояния и перемешивание его вращающимся инструментом.

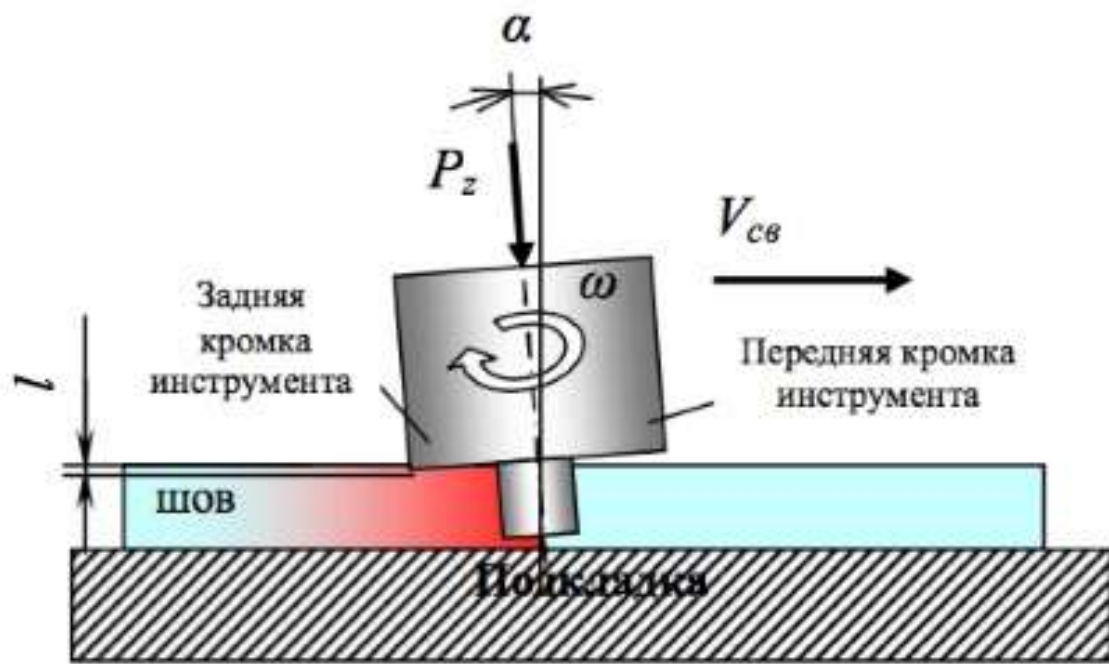
После погружения инструмент перемещается по линии соединения со скоростью сварки. Объем, в котором формируется шов, ограничивается сверху заплечиком инструмента.







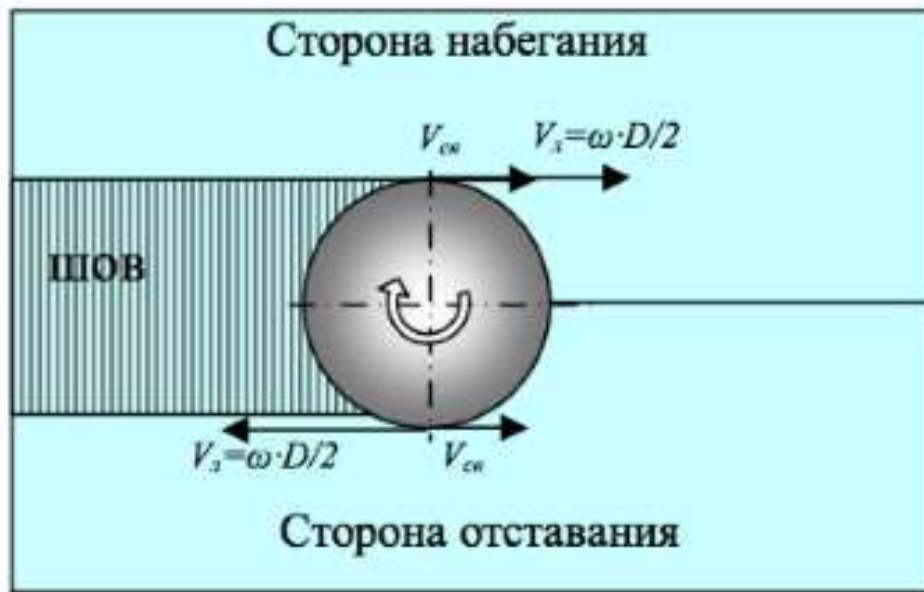
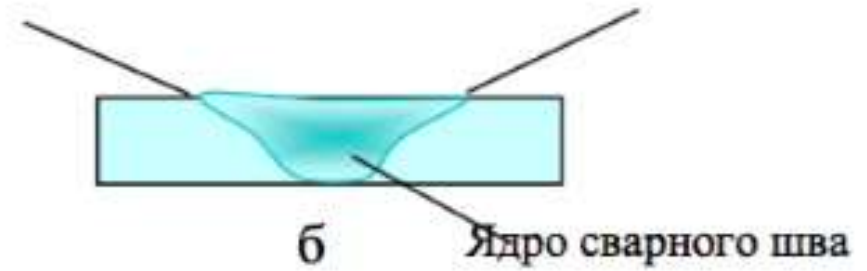




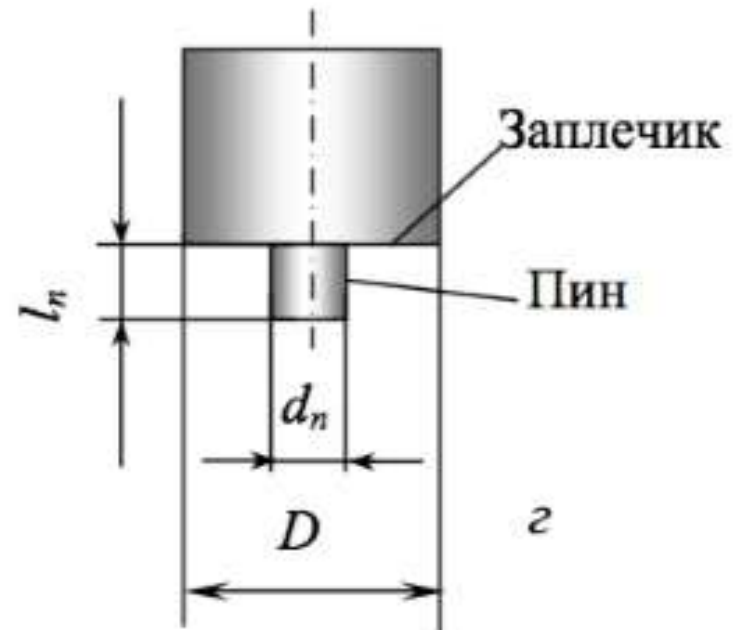
a

Сторона набегания

Сторона отставания



в



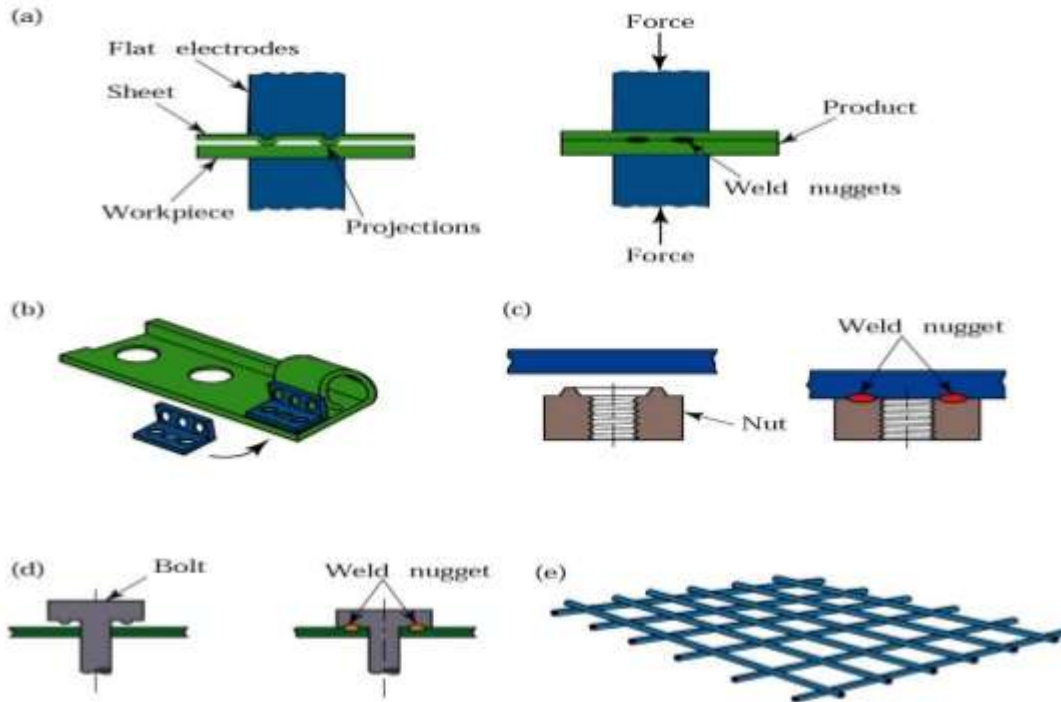
г





Сварка меди и стали

Resistance Projection Welding (RPW)



https://www.slideshare.net/parveenkr/cnc-machine-for-begainers?next_slideshow=1