

Annealing Of steel

By the ASM Committee on Annealing of steel

ANNEALING is a generic term denoting a treatment that consists of heating to and holding at a suitable temperature followed by cooling at an appropriate rate, primarily for softening of metallic materials. It is also applied to produce desired changes in other properties or in microstructure. Steels may be annealed to facilitate cold working or machining, to improve mechanical or electrical properties, or to promote dimensional stability. The choice of an annealing treatment that will provide an adequate combination of such properties at minimum expense often involves a compromise. Terms used to denote steels are descriptive of the method used, the equipment used or the condition of the material after treatment. Many of these terms are discussed in the following sections or are defined in the glossary of annealing terminology at the end of this article.

Basic concepts

Critical Temperatures. The critical temperatures that must be considered in discussing annealing of steel are those that define the onset and completion of the transformation to or from austenite. For a given steel, for a given steel, the critical temperatures depend on whether the steel is being heated or cooled. Critical temperatures for the start and completion of the transformation to austenite during heating are denoted, respectively, by A_{c1} and A_{c3} for hypoeutectoid steels and by A_{c1} and A_{cm} for hypereutectoid steels. These temperatures are higher than the corresponding critical temperatures for the start and completion of the transformation from austenite during cooling which are denoted, respectively, by A_{r3} and A_{r1} for hypereutectoid steels, these critical temperatures converge to the equilibrium values A_{e1} , A_{e3} and A_{cm} as the rates of heating or cooling become infinitely slow. Figure 1 illustrates the positions of the A_{e1} , A_{e3} and A_{cm} lines on the equilibrium phase diagram for plain carbon steels. The presence of other alloying elements will also have marked effects on these critical temperatures.

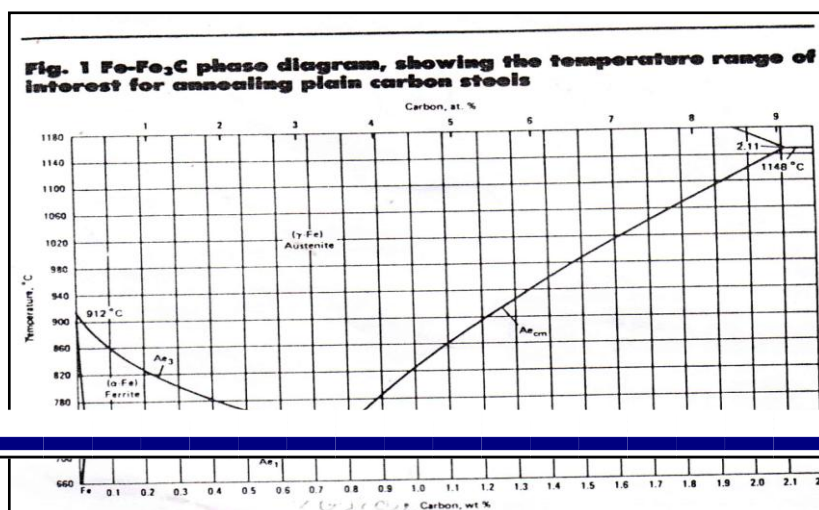
Table 1 provides critical temperatures for selected steels, measured at heating and cooling rates of 28 C/h (50 F/h). The equilibrium critical temperatures generally lie about midway between those for heating and cooling at equal rates. Because annealing may involve various ranges of heating and cooling rates in combination with iso thermal treatments, the less specific terms A_1 , A_3 and A_{cm} are used here in discussing the basic concepts.

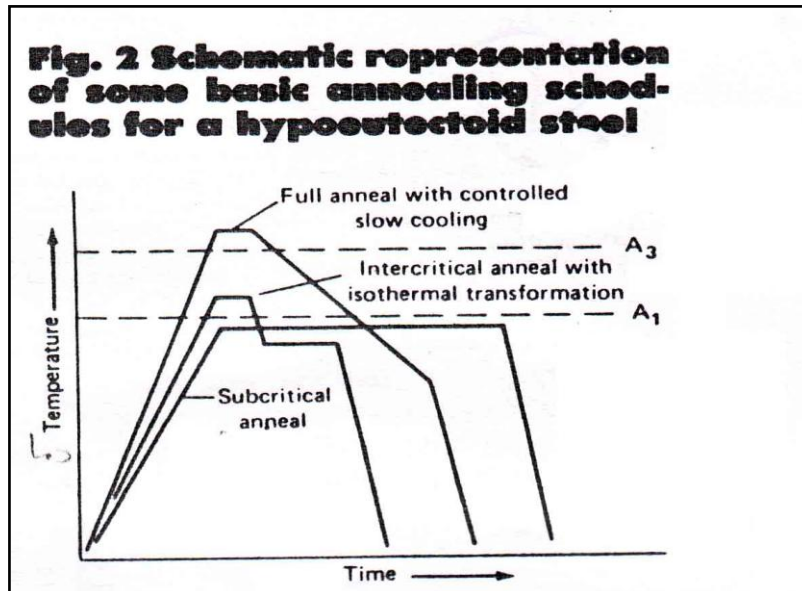
Annealing Cycles.

In practice, specific thermal cycles of an almost infinite variety are used to achieve the various goals of annealing. These cycles fall into several broad categories that can be classified according to the temperature to which the steel is heated and the method of cooling used. The maximum temperature may be below the lower critical temperature, A_1 , (subcritical annealing) above A_1 subcritical annealing above A_1 but below the upper critical temperature, A_3 IN hypoeutectoid steels or A_{cm} in hypereutectoid steels (intercritical annealing) or above A_3 (full annealing).

Because some austenite is present at temperatures above A_1 cooling practice through transformation is a crucial factor in achieving desired microstructures and properties. Accordingly, steels heated above A_1 are subjected either to slow continuous cooling or to isothermal treatment at some temperature below A_1 at which transformation to the desired microstructure can occur in a reasonable amount of time. These

Generalized treatments are illustrated schematically in Fig. 2. Under certain conditions, two or more such cycles may be combined or used in succession to achieve the desired results. The success of any annealing operation depends on proper choice and control of the thermal cycle. Based on the metallurgical principles discussed in the following sections.





Heating Below A_1 . Subcritical annealing does not involve formation of austenite. The prior condition of steel is modified by such thermally activated processes as recovery, recrystallization, grain growth, and agglomeration of carbides. The prior history of the steel is, therefore, an important factor.

In as-rolled or forged hypoeutectoid steels containing ferrite and pearlite, subcritical annealing can adjust the hardnesses of both constituents. But excessively long times at temperature may be

required for substantial softening. The subcritical treatment is most effective when applied to hardened or cold worked steels, which recrystallize readily to form new ferrite grains. The rate of softening increases rapidly as the annealing temperature has very little effect on the established microstructure and resultant properties.

A more detailed discussion of the metallurgical processes involved in subcritical annealing is provided in Ref 2.

Heating Above A_1 .

Austenite begins to form when the temperature of the steel exceeds A_1 . In hypoeutectoid steels, the equilibrium structure in the intercritical range between A_1 and A_3 consists of ferrite and austenite, and

above A_3 the structure becomes completely austenitic. However, the equilibrium mixture of ferrite and austenite is not achieved instantaneously. Undissolved carbides may persist, especially if the austenitizing time is short or the temperature is near A_1 .

causing the austenite to be inhomogeneous. In hypereutectoid steels, carbide and austenite coexist in the intercritical range between A_1 and A_{cm} and the homogeneity of the austenite depends on time and temperature. The degree of homogeneity in the structure at the austenitizing temperature the degree of homogeneity in the structure at the austenitizing temperature is an important consideration in the development of annealed structures and properties the more homogeneous structures developed at higher austenitizing temperatures tend to promote lamellar carbide structures on cooling, whereas lower austenitizing temperatures in the intercritical range result in less homogeneous austenite, which promotes formation of spheroidal carbides.

Decomposition of Austenite

Austenite formed when steel is heated above the A_1 . The rate of austenite decomposition and the tendency of the carbide structure to be either lamellar or spheroidal depend largely on the

temperature of transformation. If the austenite transforms just below A_1 it will decompose slowly. The product then may contain relatively coarse spheroidal carbides or coarse lamellar pearlite, depending on the composition of the steel and the austenitizing temperature, this product tends to be very soft. However, the low rate of transformation at temperatures just below A_1 necessitates long holding times in isothermal treatments, or very low cooling rates in continuous cooling, if maximum softness is desired. Isothermal continuous cooling in terms of achieving desired structure and softness in the minimum amount of time. Sometimes, however, the available equipment or the mass of the steel part being annealed may make slow continuous cooling the only feasible alternative.

As the transformation temperature decreases, austenite generally decomposes more rapidly, and the transformation product is harder, more lamellar and less coarse than the product formed just below A_1 . At still lower transformation temperatures. The product becomes a much harder mixture of ferrite and carbide, and

carbide, and the time necessary for complete isothermal transformation may again increase. Temperature-time plots showing the progress of austenite transformation under isothermal (IT) or continuous cooling transformation (CCT) conditions for many steels have been widely published (Ref 3 and 4) and illustrate the principles just discussed. These IT or CCT diagrams may be helpful in design or annealing treatments for specific grades of steel, but their usefulness is limited because most published diagrams represent transformation from a fully austenitized, relatively homogeneous condition, which is not always desirable or obtainable in annealing. However, transformation diagrams (either IT or CCT) that represent cooling from a specific austenitizing treatment may be developed by use of the techniques discussed in Ref 1. Such diagrams provide the information necessary for design of effective annealing schedules.

COOLING After Transformation.

After the austenite has been completely transformed, little else of metallurgical consequence can occur during cooling to room temperature. Extremely slow cooling may cause some agglomeration of carbides and consequently, some slight further softening of the steel. But in this regard such slow cooling is less effective than high-temperature transformation. Therefore, there is no metallurgical reason for slow cooling after transformation has been completed, and the steel may be cooled from the transformation temperature as rapidly as feasible in order to minimize the total time required for the operation.

If transformation by slow continuous cooling has been used, the temperature at which controlled cooling may be stopped depends on the transformation characteristics of the steel. However, the mass of the steel or the need to avoid oxidation are practical considerations that may require retarded cooling to be continued below the temperature at which austenite transformation ceases.

Effect of Prior Structure

Finer and more evenly distributed the carbides in the prior structure, the faster the rate at which austenite formed above A_1 will approach complete homogeneity. The prior structure, therefore, can affect the response to annealing. When spheroidal carbides are desired in the annealed structure, preheating at temperatures just below A_1 sometimes is used to agglomerate the prior carbides in order to increase their resistance to solution in the austenite on subsequent heating. The presence of undissolved carbides or concentration gradients in the austenite promotes formation of a spheroidal, rather than lamellar, structure when the austenite is transformed. Preheating to enhance spheroidization is applicable mainly to hypoeutectoid steels but also is useful for some hypereutectoid low-alloysteels.

Austenitizing Time and Dead Soft Steel.

Hypereutectoid steels can be made extremely soft by holding at the austenitizing temperature, Although the time at the austenitizing

temperature may have only a small effect on actual hardness (such as a change from 241 to 229 HB). Its effect on machinability or cold forming properties may be appreciable.

Long-term austenitizing is effective in hypereutectoid steels because it produces agglomeration of residual carbides in the austenite. Coarser carbides promote a softer final product. In low-carbon steels, carbides are unstable at temperatures above A_1 and tend to dissolution may be slow.

Steels that have approximately eutectoid carbon contents generally form a lamellar transformation product if austenitized for very long periods of time. Long-term holding at a temperature just above the A_1 temperature may be as effective in dissolving carbides and dissipating carbon-concentration gradients as is short-term holding at a higher temperature.

Guidelines for Annealing

The metallurgical principles discussed above have been incorporated by Payson (Ref 1) into the following seven rules,

which may be used as guidelines for development of successful and efficient annealing schedules:

Rule 1: The more homogeneous the structure of the as-austenitized steel, the more completely lamellar will be the structure of the annealed steel.

Conversely, the more heterogeneous the structure of the as-austenitized steel, the more nearly spheroidal will be the annealed carbide structure.

Rule 2: The softest condition in the steel is usually developed by austenitizing at a temperature less than 56 C (100 F) above A_1 and transforming at a temperature (usually) less than 56 C (100 F) below A_1 .

Rule 3: Because very long times may be required for complete transformation at temperatures less than 56 C (100 F) below A_1 , allow most of the transformation to take place at the higher temperature, where a soft product is formed and finish the transformation at a lower temperature, where the time required for completion of transformation is short.

Rule 4: After the steel has been austenitized, cool to the transformation temperature as rapidly as feasible in order to minimize the total duration of the annealing operation.

Rule 5: After the steel has been completely transformed, at a temperature that produces the desired microstructure and hardness, cool to room temperature as rapidly as feasible, to decrease further the total time of annealing.

Rule 6: To ensure a minimum of lamellar pearlite in the structures of annealed 0.70 to 0.90% C tool steels and other low-alloy medium-carbon steels, preheat for several hours at a temperature about 28 C (50 F) below the lower critical temperature (A_1) before austenitizing and transforming as usual.

Rule 7: To obtain minimum hardness in annealed hypereutectoid alloy tool steels, heat at the austenitizing temperature for a long time (about 10 to 15 h). then transform as usual.

These rules are applied most effectively when the critical temperatures and transformation characteristics of the steel have

Table 2 Recommended temperatures and cooling cycles for full

Data are for forgings up to 75 mm (3 in.) in section thickness. Time at temperature usually is a minimum of 1 h for sections up to 25 mm (1 in.) thick; 1/2 h is added for each additional 25 mm (1 in.) of thickness.

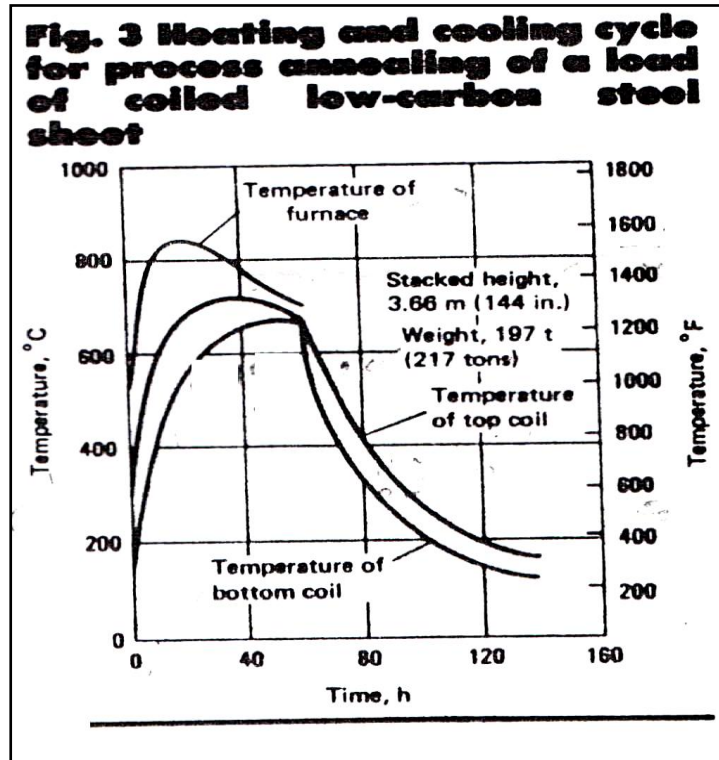
been established and when transformation by isothermal treatment is feasible.

Annoaling Tomperatures

For many annealing applications, it is sufficient simply to specify that the steel be cooled in the furnace from a designated annealing (austenitizing) temperature. Temperatures and associated Brinell hardnesses for simple annealing of carbon steels are given in Table 2, and similar data for alloy steels are presented in Table 3.

Heating cycles that employ austenitizing temperatures in the upper ends of the ranges given in Table 3 should result in pearlitic

structures. Predominantly spheroidized structures should be obtained when lower temperatures are used.



When an alloy steel is annealed to obtain a specific microstructure, greater precision is required in specifying temperatures and cooling conditions for annealing. Table 4 presents, for a variety of standard alloy steels, typical schedules for such annealing operations.

In isothermal annealing to produce a pearlitic structure, particularly in forgings, an austenitizing temperature as much as

70 C (125 F) higher than that indicated in Table 4 may be selected in order to decrease the austenitizing time.

For most steels, as indicated in Table 4, annealing may be accomplished by heating to the austenitizing temperature and then either (a) cooling in the furnace at a controlled rate or (b) cooling rapidly to, and holding at, a lower temperature for isothermal transformation. Both procedures result in virtually the same hardness, however, considerably less time is required for isothermal transformation.

Uniformity of Temperature.

One potential contribution to the failure of an annealing operation is a lack of knowledge of the temperature distribution within the load of steel in the furnace. Furnaces large enough to anneal 18 t (20 tons) of steel at a time are not uncommon. The larger the furnace. The more difficult it is to establish and maintain uniform temperature conditions throughout the load, and the more difficult

it is to change the temperature of the steel during either heating or cooling.

Furnace thermocouples indicate the temperature of the space above, below or beside the load, but this temperature may differ by 28 C (50 F) or more from the temperature of the steel itself (see Fig. 3), especially when the steel is in a pipe or box or when bar or strip is packed in dense charge in a quiescent Atmosphere, when these conditions exist, the distribution of temperature throughout the load during heating and cooling should be established by

Placing thermocouples among the bars, forgings or coils, Regulation of the furnace during the annealing operation should be based on the temperatures indicated by these thermocouples, which are in actual contact with the steel, rather than on the temperatures indicated by the furnace thermocouples.

Sphoroidizing

Steels may be spheroidized-that is heated and cooled to produce a structure of globular carbides in a ferritic matrix-by the following methods:

- 1- prolonged holding at a temperature just below A_{e1} .
- 2- Heating and cooling alternately between temperatures that are just above A_{c1} and just below A_{r1} .
- 3- Heating to a temperature above A_{c1} , and then either cooling very slowly in the furnace or holding at a temperature just below A_{r1}
- 4- Cooling at a suitable rate from the minimum temperature at which all carbide is dissolved, to prevent reformation of a carbide network, and then reheating in accordance with method 1 or 2 above (applicable to hypereutectoid steel containing a carbide network).

The rates of spheroidizing provided by these methods depend somewhat on prior microstructure, being greatest for quenched structures in which the carbide phase is fine and dispersed. Prior

cold work also increases the rate of the spheroidizing reaction in a subcritical spheroidizing treatment.

For full spheroidizing, austenitizing temperatures either slightly above the A_{c1} temperature or about midway between A_{c1} and A_{c1} is to be used, good loading characteristics and accurate temperature controls are required for proper results, otherwise, it is conceivable that A_{c1} may not be reached and thus that austenitization may not occur. Because time and temperature affect austenitization and thereby influence the number of undissolved carbides from which nucleation and coalescence of the spheroids occur, close control of temperature is necessary. For example, if it is determined that spheroidization of a given steel will require an austenitizing temperature of 750 °C (1358 °F) a deviation of 11 °C (20 °F) may easily result in an incompletely spheroidized structure. The spheroidized structure is desirable when minimum hardness, maximum ductility or (for high-carbon steels) maximum machinability is portend. Low-carbon steels are seldom spheroidized for machining, because in the spheroidized condition

they are excessively soft and gummy, cutting with long, tough chips, when low carbon steels are spheroidized, it is generally to permit severe deformation for example when 1020 steel tubing is being produced by cold drawing in two or three passes, a spheroidized structure will be obtained if the material is annealed for 1/2 to 1 at 960 C (1275 F) after each pass. The final product will have a hardness of about 163 HB. Tubing in this condition will be able to withstand severe deformation during subsequent. Cold forming.

As with many other types of heat treatment, hardness after spheroidizing depends on carbon and alloy contents. Increasing the carbon or alloy content. Or both, results in an increase in the as-spheroidized hardness. Which generally ranges from 163 to 212 HB (Table 4).

Process Annealing

As the hardness of steel increases during cold working, ductility decreases and additional cold reduction becomes so difficult that

the material must be annealed to restore its ductility such annealing between processing steps is referred to as in-process or simply process annealing. It may consist of any appropriate treatment. In most instances. However, a subcritical treatment is adequate and least costly, and the term process annealing without further qualification usually refers to an in-process subcritical anneal. Refers to an in-process subcritical anneal. It is often necessary to specify process annealing for parts that are cold formed by stamping, heading or extrusion. Hot worked high-carbon and alloy steels also are process annealed to prevent them from cracking and to soften them for shearing, turning straightening.

Process annealing usually consists of heating to a temperature below A_{e1} ,

Soaking for an appropriate time and then cooling usually in air,

In most instances, heating to a temperature between 11 and 22 C (20 and 40 F) below A_{c1} produces the best combination of microstructure, hardness and mechanical properties. Temperature

controls are necessary only to prevent heating the material above A_{e1} and thus defeating the purpose of annealing.

When process annealing is performed merely to soften a material for such operations as cold sawing and cold shearing, temperatures well below A_{e1} normally are used and close controls are unnecessary.

In the wire industry, process annealing is used as an intermediate treatment between the drawing of wire to a size slightly larger than the desired finished size and the drawing of a light reduction to the finished size. Wire thus made is known as annealed in process wire. Process annealing is used also in the production of wire sufficiently soft for severe upsetting, and to permit drawing the smaller sizes of low carbon and medium-carbon steel wire that cannot be drawn to the desired small size directly from the hot rolled rod. Process annealing is more satisfactory than spheroidize annealing for a material that. Because of its composition or size (or both) cannot be drawn to finished size because it either lacks ductility or does not meet physical requirements. Also, material

that is cold sheared during processing is process annealed to raise the ductility of the sheared surface to a level suitable for further processing.

Examples. A change to process an annealed material was required, to overcome fabrication problems in two production operations involving 1040 and 1045 steels. Spheroidized 1040 steel was too soft for cold shearing, and when spheroidized 1045 steel was subsequently cold headed into stub shafts, excessive machining problems were encountered because of burrs and poor finish.

However, a spheroidized material may be necessary because of the sequence or severity of forming operations. Or because of the mechanical properties desired in the end product. Thus. To eliminate cracks developed in process annealed 1035 steel during cold working for producing large-head provided by spheroidizing was required. In another operation, involving. 1038 steel. Spheroidizing was necessary so that the hardness of the end product was in the specified range of 78 to 88 HRB.

Annoalod structures for Machining

Different combinations of microstructure and hardness, considered together, are significant in terms of machiningability. For instance, Fig. 4 shows that a partially spheroidized 5160 steel shaft was machined (by turnig) with much less tool wear and better surface finish than the same steel in the an nealed condition with a pearlitic micro structure and a higher hardness. Based on many observations, optimum micro structures for machining steels of vari ous carbon contents are usually as follows.

Carbon, %	optimum microetstructure
0.06 to 0.20	As rolled (most economi cal)
0.20 to 0.30	Under 75-mm (3-in.) diam, normalized; Diam, normalized. 75- mm diam and over, 88 rolled
0.30 to 0.40	Annealed, to produce Coarse pearlite, minimum ferrite
0.40 to 0.60	coarse lamellar pearlite To coarse spheroidite
0.60 to 1.00.....	100% spheroidite, coarse to fine

The type of machining operation is also a factor. For example, certain gears were made from 5160 steel tubing by the dual operation of machining in automatic screw machines and broaching of cross slots, the screw machining operations were easiest with thoroughly spheroidized material, but a pearlitic structure was more suitable for broaching. A semispheroidized structure proved to be a satisfactory compromise.

Semispheroidized structures can be achieved by austenitizing at lower temperatures, and sometimes at higher cooling rates, than those used for achieving pearlitic structures. The semispheroidized structure of the 5160 steel tubing mentioned above was obtained by heating to 790 °C (1450 °F) and cooling at 25 °C/h (50 °F/h) to 650 °C (1200 °F). For this steel, austenitizing at a temperature of about 775 °C (1425 °F) results in more spheroidization and less pearlite.

Medium-carbon steels are much more difficult to spheroidize fully than high-carbon steels such as 1095 and 52100. In the absence of excess carbides to nucleate and promote the

spheroidizing reaction, it is more difficult to achieve complete freedom from pearlite in practical heat treating. Cycles.

At lower carbon levels. Structures consisting of coarse. Blocky pearlite in a ferrite matrix often are found to be the most machinable. In some alloy steels, this type of structure can best. Be achieved by heating to temperatures well above A_{c3} to establish a coarse austenite grain size, then holding below A_{r1} to allow coarse, lamellar pearlite to form. This process sometimes is referred to as cycle annealing or lamellar annealing. For example, forged 4620 steel gears were heated rapidly in a five-zone furnace to 980 C (1160 to 1180 F) in a water – cooled zone and held at that temperature for 120 to 150 min. The resulting structure – coarse, lamellar pearlite in ferrite matrix – had a hardness of 140 to 146 HB. (Ref 5).

Types of Furnaces

Furnaces for annealing are of two basic types: batch furnaces and continuous furnaces. Within either of these two types, furnaces

can be further classified according to configuration, type of fuel used, method of heat application, and means by which the load is moved through, or supported in, the furnace.

Other factors that must be considered in furnace selection are cost, type of annealing cycle, required atmosphere, and physical nature of parts to be annealed. In many cases. However, the annealing cycle used is dictated by the available equipment.

Batch-type furnaces are necessary for large parts such as heavy forgings and often are preferred for small lots of a given part or grade of steel and for the more complex alloy grades requiring long cycles. Specific types of batch furnaces include car-bottom, box, bell and pit furnaces. These furnaces may be controlled manually or may be controlled manually or may be equipped with programmed controllers that permit automatic operation.

Continuous furnaces such as roller hearth rotary – hearth and pusher types are ideal for isothermal annealing of large quantities of parts of the same grade of steel. These furnaces can be

designed with various individual zones, allowing the work to be consecutively

Brought to temperature, held at temperature, and cooled at the desired rate for more detailed discussion of the types of furnaces available for annealing, see Ref 6.

Table 3 Recommended annealing temperatures for alloy steels (furnace cooling)

Steel	Annealing temperature		Hardness (max), HB
	°C	°F	
1330	845-900	1550-1650	179
1335	845-900	1550-1650	187
1340	845-900	1550-1650	192
1345	845-900	1550-1650	...
3140	815-870	1500-1600	187
4037	815-855	1500-1575	183
4042	815-855	1500-1575	192
4047	790-845	1450-1550	201
4063	790-845	1450-1550	223
4130	790-845	1450-1550	174
4135	790-845	1450-1550	...
4137	790-845	1450-1550	192
4140	790-845	1450-1550	197
4145	790-845	1450-1550	207
4147	790-845	1450-1550	...
4150	790-845	1450-1550	212
4161	790-845	1450-1550	...
4337	790-845	1450-1550	...
4340	790-845	1450-1550	223
50B40	815-870	1500-1600	187
50B44	815-870	1500-1600	197
5046	815-870	1500-1600	192
50B46	815-870	1500-1600	192
50B50	815-870	1500-1600	201
50B60	815-870	1500-1600	217
5130	790-845	1450-1550	170
5132	790-845	1450-1550	170
5135	815-870	1500-1600	174
5140	815-870	1500-1600	187
5145	815-870	1500-1600	197
5147	815-870	1500-1600	197
5150	815-870	1500-1600	201
5155	815-870	1500-1600	217
5160	815-870	1500-1600	223
51B60	815-870	1500-1600	223
50100	730-790	1350-1450	197
51100	730-790	1350-1450	197
52100	730-790	1350-1450	207
6150	845-900	1550-1650	201
81B45	845-900	1550-1650	192
8627	815-870	1500-1600	174
8630	790-845	1450-1550	179
8637	815-870	1500-1600	192
8640	815-870	1500-1600	197
8642	815-870	1500-1600	201
8645	815-870	1500-1600	207
86B45	815-870	1500-1600	207
8650	815-870	1500-1600	212
8655	815-870	1500-1600	223
8660	815-870	1500-1600	229
8740	815-870	1500-1600	202
8742	815-870	1500-1600	...
9260	815-870	1500-1600	229
94B30	790-845	1450-1550	174
94B40	790-845	1450-1550	192
9840	790-845	1450-1550	207

Furnace Atmospheres

Electric furnaces used with air atom spheres, and gs furnces used with atmospheres consisting of the products of combustion cannot be regulated for complete elimination of oxidation of the steel being treated, Only atom spheres independent of the fuel are generally considered satisfactory for clean or bright annealing. Excessive oxidatioin during annealing usually is prevented by the use of controlled at mospheres in conjunction with a suit able furnace that is designed to exclude air and combustion gases from the heating chamber. The gases and gas mixtures used for controlled atmospheres depend on the metal being treated. The treatment temperature and the surface requirements of the parts being annealed. The need to eliminate decarburization as well as oxidation is often a significant factore in the selection of annealing atmospheres.

The gas most widely used as a protective atmosphere for annealing is exothermic gas, This gas is inexpensive, the raw

materials for making it are readily available and the results obtained with it are generally excellent.

Hydrocarbon gases such as natural gas, propane, butane and coke-oven gas are commonly burned in an exothermic-gas producer, creating a self-supporting, heat-producing combustion reaction. a commonly used exothermic gas mixture contains 15% H_2 , 10% CO, 5% CO_2 , 1% CH_4 AND 69% N_2 . This gas is used for bright annealing of cold rolled lowcarbon steel strip. It will decarburize medium-carbon and high-carbon steels, however, because of the carbon dioxide and water vapor it contains.

Exothermic gas sometimes is refrigerated to reduce its moisture content, particularly in geographic areas where the temperature of the water used for cooling is high. When decarburization of workpiece surfaces must be prevented, water vapor and carbon dioxide must be completely removed from the gas. Purified exothermic gas, with its carbon dioxide and water vapor removed, has many applications in heat treatment of steel without decarburization.

Purified rich exothermic gas, formed by partial combustion, is used for short cycle annealing and process annealing of medium and high carbon steels of the straight-carbon and alloy types. For long-cycle batch annealing, however, this gas is unsuitable, because its high carbon monoxide content results in soot deposits on the work and because of the possibility of surface etching as a result of the relatively long time for which the work is in the critical low-temperature range where gas reactions can occur. In short-cycle annealing, these effects are minimal and the high-co gas is then desirable because of its high carbon potential. The fairly lean purified gas formed by more complete combustion is used for longcycle annealing of medium-and high carbon steels of the straight carbon and alloy types, and for batch and continuous annealing of low-carbon steel strip for tin plating.

Other atmospheres commonly used in annealing include endothermicbase, dissociated ammonia, vacuum, and nitrogen – base atmospheres, which consist of nitrogen plus additions such as hydrogen, methane, methanol and carbon monoxide. For more

complete information, see the article on furnace atmospheres in this volume.

Annealing of sheet and strip

In terms of total tonnage of material processed, annealing of sheet and strip during production of steel-mill products represents the major use of annealing. Because such annealing is done to prepare the material for further processing (such as additional cold rolling or fabrication into part) and because

The temperatures employed are usually below the A_1 temperature, the more specific terms subcritical annealing and process annealing are appropriate, although common practice is to use the term annealing without qualification.

In annealing of sheet and strip, two techniques predominate: the batch process and the continuous process. In the batch process (also called box annealing) coils or cut lengths of sheet are placed on an annealing base and covered with containers that are sealed to hold the appropriate atmosphere, A furnace is then placed over

the covered steel. A protective atmosphere is introduced with the inner covers to protect the steel from oxidation, and is circulated through the coils by use of fans and conveyor plates. Heating is provided by the outer furnace and may be done either through use of radiant tubes or by direct firing. The charge is heated to the required temperature and held for a period of time that will result in the desired properties. The outer furnace is then removed, and the coils are allowed to cool under the inner covers. When the temperature has been reduced to the point where oxidation of the steel will not occur, the inner covers are removed and the steel is forwarded for further processing.

In the continuous process, steel coils are uncoiled and drawn through a furnace where they are subjected to the annealing cycle under a protective atmosphere. After the sheet or strip has been cooled and removed from the furnace, further in-line processing (such as hot dip galvanizing) may be done, or the steel may be cut into sheets. In general, however, the steel is recoiled and then forwarded as in the batch process.

Carbon, %	Optimum microstructure
0.06 to 0.20	As rolled (most economical)
0.20 to 0.30	Under 75-mm (3-in.) diam, normalized; 75-mm diam and over, as rolled
0.30 to 0.40	Annealed, to produce coarse pearlite, minimum ferrite
0.40 to 0.60	Coarse lamellar pearlite to coarse spheroidite
0.60 to 1.00	100% spheroidite, coarse to fine

In addition to the obvious differences in equipment. The batch process and the continuous process differ considerably in several other ways. Batch annealing may require up to a week because of the large mass of material being treated, whereas continuous annealing is accomplished in about five minutes. Differences are also evident in the temperatures employed, with the batch process generally being conducted at lower temperatures. Because in batch annealing it is difficult to ensure that the temperature is uniform throughout the charge (which may consist of several hundred tons of steel), the continuous process offers the potential of more uniform properties. The short annealing times of the continuous process,

however, frequently result in hardness levels alightly higher than those of similar material annealed by the batch process.

Cold Rolled plain crbon sheet and strip.

The usual method of manufacturing cold rolled sheet and strip is to produce a hot rolled coil, pickle it to remove scale (oxide) and coil, pickle it to remove scale (oxide) and cold roll it to the desired final gage. Cold rolling may reduce the thickness of the hot rolled reduce the thickness of the hot. Rolled matrial in excess of 90%, which increases the hardness and strength of the steel but severely decreases its ductility, If any large amount of subsequent cold working is to be done, the ductility of the steel must be restored, Annealing of cold rolled steel normally is designed to produce a recrystallized ferrite microstructure from the highly elongated, stressed grains resulting from cold work. During heating of the steel, and in the first segment of the holding protion of the cycle, the first metallurgical process to occur is recovery. During this process, internal strains are relieved (although little

change in the microstructure is evident), ductility is moderately increased and strength is slightly decreased.

As annealing continues, the process of recrystallization occurs, and new more equiaxed ferrite grains are formed from the elongated grains. During recrystallization, strength decreases rapidly, with a corresponding increase in ductility. Further time at temperature causes some of the newly formed grains to grow at the expense of other grains, this is termed grain growth and results in modest decreases in strength and small (but often significant) increases in ductility. Most plain carbon steels are given an annealing treatment that promotes full recrystallization, but care must be taken to avoid excessive grain growth, which can lead to surface defects (such as orange peel) in formed parts.

The rates at which the metallurgical processes noted above proceed are functions of both the chemical composition and the prior history of the steel being annealed. For example, small amounts of elements such as aluminum, titanium, niobium, vanadium and molybdenum can decrease the rate at which the

steel will recrystallize, making the annealing response sluggish and therefore necessitating either higher temperatures or longer annealing times to produce the same properties. Although the presence of these alloying elements is generally the result of deliberate additions intended to modify the properties of the sheet (as in the case of aluminum, titanium, niobium and vanadium), some elements (molybdenum, for example) in quantities great enough to modify the response to annealing. Conversely, larger amounts of cold work (greater cold reductions) will accelerate the annealing response. Therefore, it is not cycle that will produce a particular set of mechanical properties in all steels; the chemical composition and the amount of cold work also must be taken into account.

Cold rolled plain carbon steels are produced to a number of different quality descriptions. Commercial quality (CQ) steel is the most widely produced and is suitable for moderate forming. Drawing quality (DQ) steel is produced to tighter mechanical – property restrictions for use in more severely formed parts.

Drawing quality special killed (DQSK) steel is produced to be suitable for the most severe forming applications. Typical properties of these grades may be found on page 156 in volume 1 of this Handbook. Structural quality (SQ) steel is produced to specified mechanical properties other than those for the above three grades.

Typical annealing cycles for all possible combinations of composition, cold reduction and grade cannot be listed here, However, typical batch annealing temperatures range from 620 to 960 C (1150 to 1270 F) for the coldest point in the charge. Cycle times vary with the grade desired and the size of the charge, but total times (from the beginning of heating to removal of the steel from the furnace) can be as long as one week.

Continuous-annealing cycles are of shorter duration and are conducted at higher temperatures than batch annealing cycles. In some applications, the annealing temperature may exceed A_1 , Typical cycles are 40 s at 700 C (1290 F) for cold rolled commercial quality sheet and 60 s at 800 C (1470 F) for drawing

quality special killed steel. Most continuous annealing of cold rolled sheet includes an overaging treatment designed to precipitate carbon and nitrogen from solution in the ferrite and to reduce the likelihood of strain aging. Overaging for 3 to 5 min at 300 to 450 C (570 to 860 F) accomplishes the desired precipitation of carbon and nitrogen.

Batch annealing and continuous annealing differ slightly in the properties they produce. Typical average properties of batch-annealed and continuous annealed commercial quality plain carbon steel are as follows:

Annealing Process	Yield strength		Elongation – %,
	MP _a	ksi	
Batch	210	30.4	43.0
Continuous	228	33.0	41.7

High – strength cold rolled sheet and strip

Are growing in importance due to their high load-bearing capacities. Strength of sheet and strip can be increased through modifications of chemical composition and/or selection of

different annealing cycles, but these methods result in decreased ductility. Plain carbon steels, produced by conventional techniques, may be batch annealed or continuous annealed under conditions that result only in recovery or partial recrystallization. Typical batch annealing cycles of this type employ soak temperatures of 425 to 480 C (800 to 900 F) and various soak times. High-strength low-alloy (HSLA) steels containing alloying elements such as niobium, vanadium and titanium also may be produced as cold rolled grades. The additional alloying produces a stronger hot rolled steel, which is strengthened even more by cold rolling Cold rolled HSLA steels may be recovery annealed to produce higher strength grades or recrystallization annealed to produce lower strength grades. Successful production of cold rolled HSLA. Steel requires selection of the appropriate combination of steel composition and hot rolled strength, amount of cold reduction and type of annealing cycle. Table 5 presents typical properties after recovery or recrystallization annealing, as

appropriate, for a family of cold rolled sheet products employing titanium as the principal strengthening element.

Hot dip galvanized products

Are produced on lines that process either preannealed (batch annealed) or full hard coils. Lines for processing full hard coils incorporate an in-line annealing capability so that annealing and hot dip galvanizing can be accomplished in single pass through the line. This in-line annealing, like continuous annealing of uncoated steel, generally results in slightly higher strength and slightly lower ductility than batch annealing. Maximum strip temperatures are below the A_1 temperature for commercial quality steel but temperatures in excess of 845 °C (1550 °F) are required for DQSK grades. Galvanizing of preannealed steel results in properties similar to those of ungalvanized material.

The atmosphere in a continuous galvanizing line, in addition to protecting the sheet from oxidation, must remove any oxides

present on the strip to promote metallurgical bonding between the steel and the zinc.

Tin mill products

Are distinguished from their cold rolled sheet mill counterparts chiefly by the fact that they are produced in lighter gages (0.13 to 0.38 mm, or 0.005 to 0.15 in.) and by the fact that some of them are coated with tin or chromium and chromium oxide for corrosion resistance. The sequence used for processing single reduced tin mill products is similar to that for cold rolled sheet—that is, pickling, cold reducing, annealing and temper rolling of hot rolled coils. Double reduced products are cold rolled an additional 30 to 40% following annealing (this step replaces temper rolling). Whereas much of the tonnage produced in tin mills is continuous annealed (facilities for continuous annealing currently are more prevalent in tin mills than in sheet mills)

Because tin mill products tradition ally have been produced at facilites separte from sheet mills and because applications for these products are different from those for cold rolled sheet, tin mill products have been assigned separte designation for indicating the mechanical properties developed during annealing. A list or fhese temper designations is givan in Table 6.

Open-coil annealing

Which is done in batch furnaces, involves loose rewinding of a cold reduced coil provide open spaces between successive laps. This allows the controlled atmosphere gasses to be drawn between the laps, providing faster and more uniform heating and cooling than are obform heating and cooling than are obtained with tightly wound coils. In addition, by control of the hydrogen content and dw point of the atom, sphere, decarburizing conditions can be established. The carbon content of the steel can thereby be reduced to low levels for such materials as enameling steel and electrical steel. Loose rewinding of coils for open-coil

annealing is done on a turntable having a vertical mandrel. As the coil is wound, a twisted wire spacer is inserted between the laps. This spacer remains in the coil during annealing and is removed after the coil has been removed from the furnace. The coil is then tightly rewound and is ready for temper rolling.

Annealing of forgings is most often performed to facilitate some subsequent operation-usually machining or cold forming. The type of annealing required is determined. The type of annealing required is determined by the kind and amount of machining or cold forming to be done as well as the type of material involved. For some processes it is essential that the microstructure be spheroidal, while for others spheroidal structures may not be necessary or even desirable.

Annealing of forgings for Machinability.

In many cases, a structure suitable for machining can be developed in low-carbon steel forgings by transferring the forgings directly from the forging operation to a furnace heated to

a proper transformation temperature, holding them at this temperature for a time sufficiently long to permit all the austenite to transform, then cooling in air. In this process, the effective austenitizing temperature is the finishing temperature of forging, not the initial forging temperature. This process is capable of producing reasonably uniform structures in forgings or uniform sections. However, in forgings shaped such that some portions are cooler than others, this difference in finishing temperature will cause the structures to be dissimilar. This process generally will not produce a spheroidal structure except in high alloy steels containing large amounts of carbide-forming elements. If a lamellar structure is suitable for subsequent operations, however, this process can minimize energy usage and lower costs by reducing processing and handling time.

In many instances where the product or subsequent process requires a more consistent hardness, forgings can be subcritical annealed by heating to temperature between 11 and 22 C (20 and 40 F) below A_{e1} , holding sufficiently long (determined by degree

of softening required) and then cooling in air (or equivalent). Care should be taken to maintain the temperature below A_{e1} to prevent formation of austenite, which would require a much lower cooling rate.

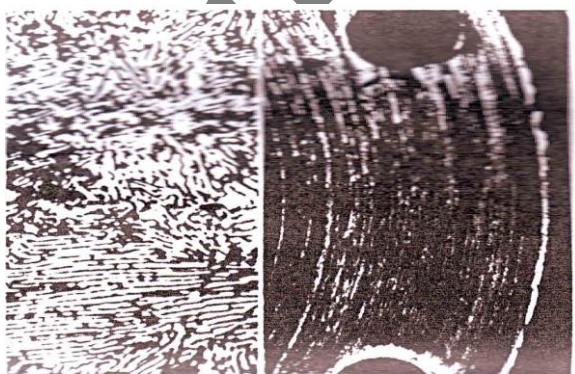
In forgings produced from high-carbon steels with or without significant amounts of alloying elements, a spheroidal structure generally is preferable for high-speed machining operations. Direct transfer of high-carbon steel forgings to a furnace for transformation sometimes can be used as the preliminary step of an annealing cycle and as a means of preventing the possibility of cracking in deep-hardening steel parts, but seldom will produce satisfactory properties alone. Most annealing of high-carbon steel forgings is done either in a batch furnace or in continuous tray pusher furnace. 52100 steel in a batch furnace are as follows.

Austenitize by holding at least 2 hr at 790 °C (1450 °F), furnace cool at 17 °C/h (30 °F/h) to 595 °C (1100 °F) then air cool.

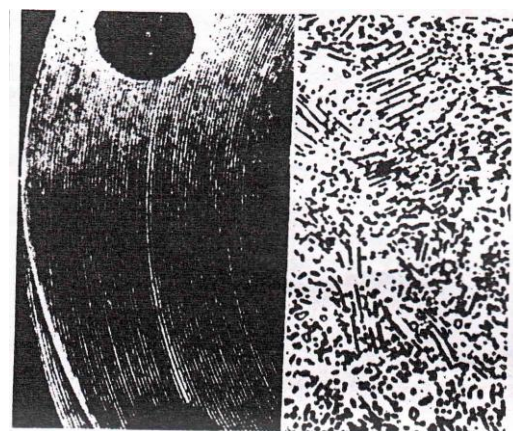
Austenitize by holding at least 2 h at 790 C (1450 F), cool as rapidly as practical to 750 C (1380 F) cool at 6 C/h (10 F/h) to 675 c 91250 f). Then air cool

Austenitize by holding at least 2 h at 790 C (1450 F). cool as rapidly as practical to 690 C (1275 F), trans form isothermally by holding at this temperature for 16 h, then air cool.

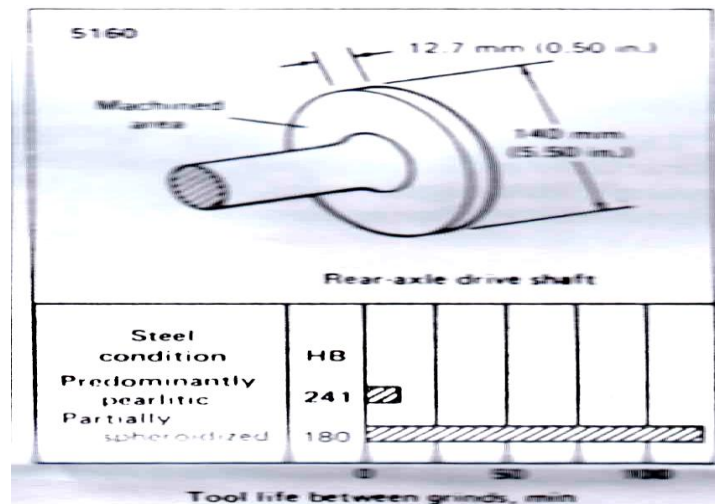
In all instances, the load should be distributed to promote uniform heating and cooling. Use of circulating fans in the furnace chamber will greatly aid in producing a product that is uniform in both hardness and microstructure. A typical continuous furnace for annealing steel forgings might consist of five or six zones. An example of specific spheroidize annealing treatment in such a furnace is given in the next section.



Annealed (pearlitic) microstructure (hardness: 241 HB), and surface finish of flange after machining of eight pieces



Partially spheroidized microstructure (hardness: 180 HB), and surface finish of flange after machining of 123 pieces



Annealing of Forgings for cold formain and Re-formain.

If a steel forging or blank requires further cold forming, it may be necessary to soften it in order to enhance its plastic-flow characteristics. In general, this type of annealing is done only to the extent that the forming operation requires that is, to satisfy dimensional, mechanical and tool life requirements as well as to prevent cracking and splitting.

Much intermediate annealing is done successfully, but cold forming processes are best performed on parts with totally spheroidized microstructures – especially for parts made of carbon steels.

In one plant, both 5160 and 52100 ized with a common cycle in a six-zone tray pusher furnace. In this cycle, the temperatures in the six zones are 750, 750, 705, 695, and 680 C (1380, 1380, 1300, 1280 and 1260 F).

Time in each zone is 150 min. This process yields 5160 steel forgings with hardnesses of 170 at 190 HB and 52100 steel parts with hardnesses of 175 to 195 HB, both suitable for cold or warm restrike operations.

Table 5 Typical properties of titanium-strengthened cold rolled steel

Minimum yield strength		Yield strength		Tensile strength		Elongation, %
MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
275	40	325	47	415	60	30
345	50	380	55	490	71	26
415	60	455	66	545	79	23
485	70	525	76	605	88	19
550	80	615	89	670	97	17
690	100	745	108	800	116	12
825	120	885	128	905	131	10
965	140	1040	151	1050	152	5

Low-carbon steels generally can be cold formed successfully after being heated to temperatures near being heated to temperatures near A_1 and then being cooled through 675 C (1250 F) at a controlled rate. In one plant, 5120 steel annealed 1 to 2 h at 745 C (1375 F) and slow cooled has been cold formed successfully.

Large quantities of 1008, 1513, 1524, 8620 and 8720 steels are being cold formed after annealings are being cold formed after annealing cycles consisting of 1 to 6 h at 720 C (1325 F) followed by slow cooling. The severity of the forming operation, as well as the grade of steel and history of the part, determines the extent of annealing required. Batch furnaces, continuous tray pusher furnaces and continuous belt furnaces are being used successfully to perform these types of annealing operations on low-carbon steels. Any part that contains significant stresses resulting from cold forming or restrike operation should be reviewed for some type of stress-relief process. Stress relieving usually is done by means of time-temperature cycles that result in slight reductions in hardness. These cycles often consist of 1 h at 425 to 675 C (800 to 1250 F).

Annealing process	Yield strength		Elongation, %
	MPa	ksi	
Batch.....	210	30.4	43.0
Continuous.....	228	33.0	41.7

Annoaling to obtain pearlitic microstructures.

Forgings – especially plain and alloy high- sometimes are isothermally annealed to produce a pearlitic microstructure that is preferred for a subsequent process. In steels that are to be induction hardened. For example, the carbide distribution of a fine pearlitic structure offers in selective hardening while producing a reasonably machinable core structure. Isothermal annealing to obtain fine pearlite can be performed in batch or continuous furnaces, however temperature control and uniformity are more critical than in conventional slow cooling cycles, because a particular microstructure and particular hardness level usually are desired. In one plant, a continuous belt type furnace is used for isothermal annealing of 1070 steel forgings. The forgings are uniformly heated for 30 min at 845 C (1550 F). cooled to 675 C (1250 F) and held for 20 min. Then rapidly cooled. The microstructure produced is essentially fine lamellar pearlite with hardness of 219 to 228 HB. The hardness and the structure can be modified by adjusting the transformation temperature.

Hardness After Annealing.

Figures 5 and 6 present data on distribution of hardness after annealing. These data are based on production annealing of forgings. Bars, tubes and rings made of 1045, 4140, 4340 8640H and 52100 steels. The details of each annealing

Designation	Hardness aim, HR30T
Batch (box) annealed products	
T-1	52 max
T-2	50 to 56
T-3	54 to 60
T-4	58 to 64
T-5	62 to 68
T-6	67 to 73
Continuously annealed products	
T-4 CA	58 to 64
T-5 CA (TU)	62 to 68
T-6 CA	67 to 73
Double-reduced products	
DR-8	73
DR-9	76
DR-9M	77
DR-10	80

vide open spaces between successive laps. This allows the controlled atmosphere gases to be drawn between the

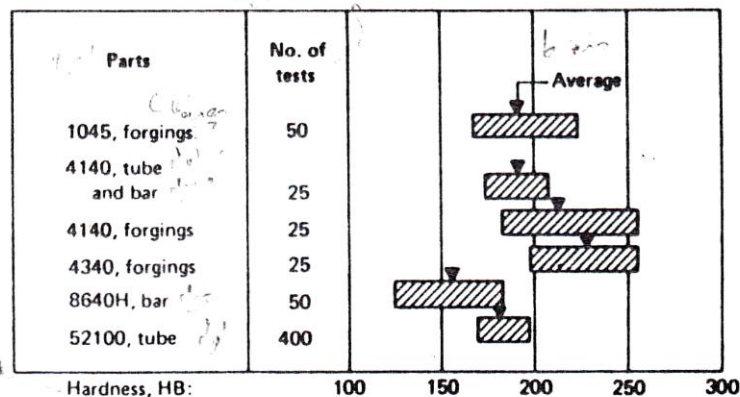
Annealing of Bar, Rod and wire

Significant tonnages of bar, rod and wire are subjected to thermal treatments that decrease hardness and prepare the material for subsequent cold working and/or machining. For lowcarbon steels (up to 0.20% C). short time subcritical annealing often is

sufficient for preparing the material for further cold working. Steels with higher carbon and alloy contents require spheroidizing, to impart maximum ductility.

Most carbon and alloy steel coiled products can be successfully spheroidized in accordance with rules 2 and 3 (see Guidelines for Annealing). In batch annealing, it is helpful to use higher-than-normal temperatures (such as 650, or 1200 F) during initial heating for purging, because the higher initial temperature promotes a lower temperature gradient in the charge during subsequent heating into the temperature range between A_1 and A_3 . Use of a higher purge temperature also promotes agglomeration of the carbides in the steel, which makes them more resistant to solution in the austenite when the charge temperature is finally elevated. These undissolved carbides will be conducive to the formation of a spheroidal rather than a lamellar structure when transformation is complete.

Fig. 5 Variation in Brinell hardness of annealed plain carbon and low-alloy steels



1045 steel forgings were heated at 790 °C (1450 °F) in a batch-type muffle furnace, furnace cooled at 11 °C/h (20 °F/h) to 650 °C (1200 °F), then air cooled. Specified maximum hardness was 207 HB. Hardness was measured on polished flash line; data cover a four-year period.

4140 seamless tubes and bars were annealed in a continuous car-bottom furnace to produce a predominantly lamellar structure. Bar diameter ranged from 47.6 to 203 mm (1.875 to 8.000 in.); tube wall thickness ranged from 16.0 to 35.0 mm (0.629 to 1.379 in.). The steel was austenitized at 885 °C (1625 °F), furnace cooled to 760 °C (1400 °F), furnace cooled at 11 °C/h (20 °F/h) to 635 °C (1175 °F), and air cooled.

4140 steel forgings for automotive transmissions were annealed in a batch furnace. Forgings were held 5 h at 675 °C (1250 °F). Hardness was measured on polished flash line. Specified hardness range was 170 to 241 HB.

4340 steel forgings for aircraft piston engines were annealed in a batch furnace. Forgings were held 8 h at 650 °C (1200 °F). Hardness was measured on polished flash line. Specified hardness range was 170 to 241 HB.

8640H hot rolled steel bars, 17.5 mm (11/16 in.) in diameter, cold heading quality, in coils, were spheroidize annealed to produce minimum hardness. Data represent as-received material.

52100 steel seamless tubes were austenitized at 790 °C (1450 °F), rapidly furnace cooled to 750 °C (1380 °F), cooled at 6 °C/h (10 °F/h) to 695 °C (1280 °F), and air cooled.

A knowledge of the temperature distribution in the furnace and in the load good, consistent response to spheroidization. Temperature distribution and control are much more critical in batch and vacuum furnaces, which may handle loads of up to 27 t (30 tons), than in continuous furnaces, in which loads of only 900

to 1800 kg (2000 to 4000 lb) may be transferred from zone to zone. Test thermocouples should be placed strategically at the top, middle and bottom (inside and outside) of the charge during development of cycles. In spheroidizing, to minimize formation of pearlite on cooling, it is important to ensure that no part of the charge be allowed to approach A_3 , conversely, if temperatures only slightly above A_1 temperature, will not be attained and That no austenitization will occur table 7. gives typical mechanical properties that can be obtained in hypoeutectoid plain carbon steels by spheroidizing in accordance with rules 2 and times for lamellar and spheroidize annealing of hypoeutectoid alloy steels are presented in Table 4.

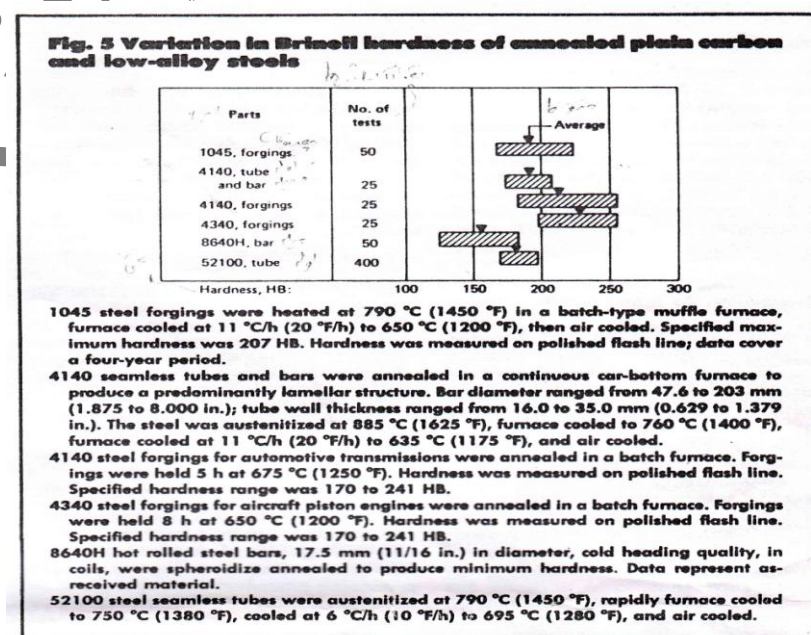


Table 7 Typical mechanical properties of spheroidized plain carbon steels

Steel	Tensile strength			
	Hot rolled MPa	ksi	Spheroidized MPa	ksi
1010	365	53	295	43
1018	450	65	365	53
1022	470	68	385	56
1030	585	85	415	60
1038	600	87	485	70
1045	675	98	515	75
1060	860	125	550	80
1065	910	132	600	87
1524	510	74	450	65
1541	710	103	540	78

Prior cold working increases the degree of spheroidization and provides even greater ductility. For example, 4037 steel in the as – rolled condition normally can be spheroidized to a tensile strength of about 515 MPa (75 ksi). If, however, the material is drawn 20% and then spheroidized (referred to as spheridize annealed in – process), resulting tensile strength will be around 470 MPa (68 ksi).

Although prior cold work can enhance response to annealing, caution must be observed in spheroidizing cold worked plain carbon steels with 0.20% C or less, Unless a reduction of at least 20% is applied, severe grain coarsening may be observed after spheroidizing.

Such grain coarsening is the result of a critical combination of strain and annealing temperature peculiar to the steel and may severely impair subsequent performance.

In the wire industry, a wide variety of in-process annealing operations have been evolved for rendering. Such grain coarsening is the result of a critical combination of strain and annealing temperature peculiar to the steel and may severely impair subsequent performance.

In the wire industry, a wide variety of in-process annealing operations have been evolved for rendering coiled material suitable for further processing that may require formability, drawability, machinability or a combination of these characteristics. One large wire mill reports current use of 42 separate and distinct annealing cycles, the majority of which represent compromise between properties. For example, annealing temperatures below those that might yield optimum softness some.

Times must used in order to preclude scaling of wire. Coils, which often can occur even in controlled-atmosphere furnaces. Even slight scaling may cause the coil wraps to stick together, which can impede coil payoff in subsequent operations.

Some of the terms used to describe various in-process annealing treatments are in common usage through out the wire industry, whereas others have been developed within specific plants or mills. No attempt will be made here to list or define all the names that refer to specific treatments.

Patenting is a special form of annealing that is peculiar to the rod and wire industry. In this process, which usually is applied to medium-and higher-carbon grades of steel, rod or wire products are uncoiled, and the strands are delivered to an austenitizing station. The strands are then cooled rapidly from above A_3 in a molten medium-usually lead at about 540 C (1000 F)- for a period of time sufficient to allow complete transformation to fine pearlitic structure. Both salt baths and fluidized beds have also been used for this purpose. This treatment increases substantially the

amount of subsequent wiredrawing reduction that the product can withstand and permits production of high-strength wire successive drawing and patenting steps may be employed. If necessary, in order to obtain the desired size and strength level.

Austenitizing for patenting can be accomplished in oil, gas, or electric furnace; in high-temperature lead or salt baths; or by induction or direct resistance heating. As an alternative to quenching in molten lead, continuous air cooling often is employed. Such air patenting is less expensive than lead patenting but results in coarser pearlite and often more proeutectoid ferrite, a microstructure that is less desirable from the standpoint of drawing high strength wire.

Annealing of plate

Plate products are occasionally annealed to facilitate forming or machining operations. Annealing of plate usually is done at subcritical temperatures, and long annealing times generally are

avoided. Maintaining adequate flatness can be a significant problem in annealing of large plates.

Annealing of tubular products

Tubular products known as mechanical tubing are used in a variety of applications that can involve machining or forming. From various grades of steel, annealing is a common treatment. In most annealing cycles, sub critical temperatures and short annealing times are used to reduce hardness to the desired level. High-carbon grades, such as type 52100 for bearings, generally are spheroidized to facilitate machining. Tubular products manufactured in pipe mills are rarely annealed. These products normally are used in the as-rolled, the normalized or the quenched and tempered condition.

Annealing Terminology

Box annealing:

Annealing of a metal or alloy in a sealed container under conditions that minimize oxidation. In box annealing of ferrous alloys the charge is heated slowly to temperature usually below the transformation range but sometimes within or above it, and is then cooled slowly. This process some times is referred to as close annealing or pot annealing.

Bright annealing:

Annealing in protective medium to prevent surface discoloration.

Finish annealing:

A subcritical annealing treatment applied to cold worked low-or medium-carbon steel. Finish annealing, which is compromise treatment, lowers residual stresses, thereby minimizing the risk of distortion in machining while retaining most of the benefits to machinability contributed by cold working.

Flame annealing:

Heating to and holding at a temperature above the upper critical temperature to obtain full austenitization, followed by either slow cooling or isothermal transformation below the lower critical temperature, specific structures and properties obtained depend on the composition and starting structure of the steel and on the particular time-temperature cycle employed.

Intercritical annealing:

Any annealing treatment that involves heating to, and holding at a temperature between the upper and lower critical temperatures to obtain partial austenitization, followed by either slow cooling or holding at a temperature below the lower critical temperature.

Intermediate annealing:

Annealing of wrought metals or alloys at one or more stages during manufacture and before final treatment.

Isotheramal annealing:

Complete or partial austenitization of a ferrous alloy, followed by cooling to and holding at a temperature at which austenite transforms to a relatively soft ferrite – carbide aggregate.

Process (or in-process) annealing:

Any annealing operation applied for the purpose of restoring ductility for further or subsequent cold work. When used without further qualification, the term usually refers to a subcritical treatment.

Recovery annealing:

A subcritical annealing operation that provides relief of residual stresses and some softening or recovery of ductility in cold

worked steel. Temperatures employed are below those that would promote formation of new grain, through recrystallization, and the degree of softening that occurs is less than that obtained by recrystallization annealing.

Recrystallization annealing:

An nealing of a cold worked metal or alloy to produce a new grain struc ture without a phase change.

Spheroidize annealing (or sphere oidizing)

Any annealing treat ment designed specifically to produce a spheroidal or globular form of carbide in the steel.

Stree relieving:

Any annealing treatment will tend to reduce resid ual stresses, but only those treat ments applied specifically for the prurpose of reducing stresss in heat treated or cold worked steels are termed stress relieving the temperatures employed in most stress relief

treatments are below those necessary for complete recrystallization.

Subcritical annealing:

Annealing at temperature below the lower critical temperature. Subcritical annealing often is used to restore ductility between cold forming or drawing operations, in which case it often is referred to as process annealing.

REFERENCES

1. The Annealing of steel, by p. payson: series of articles in Iron Age, June and July 1943, subsequently published as 62-page booklet by crucible steel co. of America
2. Annealing Heat Treatments, by B.R. Banerjee: Metal progress, Nov 1980, p 59
3. Atlas of Isothermal Transformation and cooling Transformation Diagrams; American society for Metals, Metals park, OH, 1977.

4. Atlas of continuous cooling Trans. Formation Diagrams for Engineering steels, by M. Atkins: American society for metals, metals park, OH, in cooperation with British steel corp. 1980
5. Annealing and carburizing close tolerance driving Gears, by W. Snyder: metal progress, oct 1965, P 121
6. The making shaping and treating of steel, 9th Ed. Edited by H.E McGannon: United states steel corp. 1971.

بادوام نمودن فولاد

نوشته کمیته استحکامبخشی فولاد ASM

استحکامبخشی اصطلاح کلی است که

بیانگرفرایندی است که متشکل از حرارتدهی و نگه داشتن در دمایی مناسب و سردکردن بانرخی مناسب که به دنبال آن خصوصیات دیگر را در ریز ساختار ایجاد نماید. فولادها ممکن است به این خاطر استحکامبخشی (آبدیده) شوند که پرداخت سرد یا ماشین کاری را تسهیل نموده، ویژگیهای مکانیکی یا الکتریکی را بهبود بخشیده یا پایداری ابعادی را تقویت نماید. انتخاب یک روش ایجاد استحکامبخشی که ترکیبی مناسب از چنین ویژگیهای را باحداقل هزینه فراهم نماید غالباً شامل یک حالت میانی است. عباراتی که برای نشان دادن انواع خاص استحکامبخشی به کار گرفته شده برای فولادها به کار میروند، توصیفکننده روش به کار رفته یا شرایط ماده پس از عملآوری هستند. بسیاری از این عبارات در بخشهای آتی شرح داده میشوند در واژهنامه اصطلاحشناسی استحکامبخشی واقع در انتهای این مقاله تعریف میگردند.

مفاهیم پایه

دماهی بحرانی

دماهای بحرانی ای که میبایست در تشریح

استحکامبخشی فولاد لحاظ شوند آنهایی هستند که

آغاز و تکمیل تبدیل به آستینت یا جوانه زنی از آن را معین می کنند . برای یک فولاد مفروض، دماهای بحرانی بستگی به حرارت دادن یا خنک کردن فولاد دارد. دماهای بحرانی برای آ آغاز و تکمیل استحاله به آستینت در طول حرارت دهی برای فولادهای هیپو و تکتوئید بترتیب توسط A_{C3}, A_{C1} و برای فولادهای هایپرا و تکتوئید بترتیب A_{CM}, A_{C1} نامگذاری می شوند. دماهای بالاتر از حد دماهای بحرانی مربوطه جهت آغاز و تکمیل آستینت در طول خنک شدن بترتیب A_{r1}, A_{r3} برای فولادهای هیپو و تکتوئید و توسط A_{r1}, A_{rcm} برای فولادهای هایپرا و تکتوئید نامگذاری می شوند. این دماهای بحرانی یک حد می شوند به مقدار تعادلی Ae_{cm}, Ae_3, Ae_1 وقتی که آهنگهای گرمایش یا خنک سازی بنهایت کند باشند . شکل 1 موقعیت های خطوط Ae_{cm}, Ae_3, Ae_1 را روی دیاگرام مرحله توازن برای فولادهای کربنی معمولی به تصویر می کشد . حضور دیگر عناصر آلیاژی هم اثرات معینی روی این دماهای بحرانی دارد.

جدول 1 دماهای بحرانی را برای فولادهای منتخب فراهم می آورد که تحت آهنگهای خنک سازی و گرمادهی 28 درجه سلسیوس در ساعت اندازه گیری شده است. (50 درجه فارنهایت در ساعت). دماهای بحرانی تعادلی عموماً حول و حوش میان ۵۰۰ تا ۶۰۰

دماهای گرم کردن و خنک‌سازی در آهنگ‌های یکسان قرار دارند. از آنجا که آنیل کردن ممکن است شامل گستره‌های مختلف آهنگ‌های خنک‌سازی و گرم‌کردن در رفتارهای هم‌دما باشد، عبارات کمتر A_{cm}, A_3, A_1 در اینجا در تشریح مفاهیم پایه به کار می‌روند.

چرخه‌های آنیلینگ (با دوام سازی):

در عمل چرخه‌های دمایی خاص یک تنوع تقریباً غیریکسان به کار می‌رود تا اهداف متعدد استحکام بخشی را حاصل نمایند. این چرخه‌ها در محدوده چند طبقه‌بندی وسیع قرار می‌گیرند، که می‌توان آنها را بر مبنای رنج دمایی که در آن فولاد حرارت می‌بیند و سرد می‌شود طبقه‌بندی کرد.

دما ممکن است پایین‌تر از دمای بحرانی پایینی A_1 (استحکام بخشی زیر بحرانی)؛ بالای A_1 اما زیر دمای بحرانی بالایی A_3 ، در فولادهای هیپو و تکتیک و یا A_{cm} در فولادهای هایپراو تکتیک (استحکام بخشی میان بحرانی) یا بالای A_3 (استحکام بخشی کامل) باشد.

از آنجا که مقداری استنیت در دماهای بالاتر از A_1 موجود است. عمل خنک‌سازی در انجام استحاله، عامل مؤثری در نیل به ساختارهای میکروسکوپی و ویژگی‌های مطلوب است. بر این اساس، فولادهای گرم شده تا بالای A_1 در معرض

خنكسازي آهسته و پيوسته يا عمليات هم دما در دمائي زير A_1 كه تحت آن تبديل به ريز ساختار مطلوب مي‌تواند ظرف مدت زمان معقولي رخ دهد، قرار داده مي‌شوند. اين عملياتهاي رايج يافته در شكل 2 بصورت شماتيك به تصوير كشیده شده اند. تحت شرايط معين، دو يا چند تا از چنين دوره‌هايي ممكن است تركيب شده يا به صورت تكي به كار روند تا نتايج مطلوب حاصل شوند. موفقيت هر گونه عمليات استج كامبخشي بستگي دارد به انتخاب و كنترل صحيح چرخه دمائي مبتني به اصول متالوژي بحث شده در بخشهاي ذيل:

گرمابخشيدن زير A_1 :

- آنيلينگ (جزيي) شامل شكل گيري آستينت نيست . شرايط قبلي فولاد توسط فرآيندهاي كه توسط دما فعالسازي شد از قبيل احيا، تبلور مجدد، رشد دانه و تجمع سازي كاربيدها، اصلاح مي‌گردد .
- بنابر اين پيشينه فولاد عملي است مهم . در فولادهاي هيپواوكتوئيد بصورت رول شده يا استحكام يافته كه حاوي فريت و پ رليت باشند، آنيلينگ مي‌تواند سختي هر دو جزء سازنده را كنترل نمايد. اما ممكن است زمانهاي بيش از حد طولاني حرارت دهی براي نرم سازي اساسي لازم باشند. عمليات زير بحراني زماني بر فولادهاي سخت شده يا سرد پرداخت شده مؤثرترين است كه

به سهولت کریستالیزه جهت تشکیل دانه های جدید فریت صورت پذیرد. آهنگ نرم شدن وقتی که دمای استحکام بخشی به A_1 نزدیک می شوند، به سرعت افزایش می یابد. عمل خنک سازی از دمای آنیلینگ زیر بحرانی اثری بسیار اندک روی ریز ساختار تثبیت یافته و ویژگی های حاصله دارد. بحثی مشروح تر از فرایندهای متالوژیک گنجانده شده در آنیلینگ زیر بحرانی در مرجع 2 فراهم شده است.

گرمابخشی بالای A_1 : آستنیت زمانی شروع به شکل گیری می کند که دمای فولاد از A_1 تجاوز نماید. در فولادهای هیپوآوتکتوئیدی، ساختار تعادلی در گستره بین دماهای بحرانی A_1 و A_3 متشکل از آستینت و فریت و بالای A_3 ساختار کاملاً آستینتی می گردد. شکل 1- دیاگرام مرحله $Fe-Fe_3C$ نشان دهنده گسترده دمایی تمایل به استحکام بخشی فولادهای کربنی معمول دماهای تبدیل تعادلی Ae_{cm}, Ae_3, Ae_1 در دیاگرام نامگذاری شده اند.

جدول 1- دماهای بحرانی تقریبی برای فولادهای کربنی و کم آلیاژی

جدول 2- ارائه شماتيك برخي زما نبندي هاي استحکامبخشي پايه براي يك فولاد هيپوا و تکتوئيد.

با اين حال ترکيبي متوازن از فريت و آستينيت بطور همزمان حاصل نمي‌شود. کاربيدهاي حل نشده ممکن است دو ام بياورند، بالاخص اگر زمان آستينتسازي کوتاه يا دما نزديک به A_1 باشد، سبب مي‌شود که آستينت ناهمگن باشد. در فولادهاي هايپراوتکتوئيد کاربيد و آستينت در گستره بين دماهاي بحراني A_1 و A_{cm} درکنار موجود بوده و همگن بودن آستينت بستگي دارد به دما و زمان. درجه همگني در ساختار در دماي آستينتي شدن اهميت قابل ملاحظه اي در توسعه ساختار و خواص آنيلينگ دارد. ساختارهاي همگن توسعه يافته در دماهاي آستينتي شدن بالاتر در سرد شدن متمايل مي شوند به ساختارهاي کاربيدي لايه اي، در حالیکه در دماهاي آستينتي شدن پايين تر در گستره دماهاي بحراني منجر مي‌شوند به آستينت با همگني کمتر که شکل گيري کاربيدهاي کروي را ترويج مي‌نمايد.

منحل گشتن آستينت:

آستينتي که وقتي فولاد به بالاي دماي A_1 گرم مي‌شود شکل مي‌گيرد، وقتي که فولاد تا زير A_1 خنک مي‌گردد مجدداً به فريت و کاربيد تبديل مي‌شود.

آهنگ انحلال آستینت و گرایش ساختار کربید به ورقه‌ای یا کروی بودن، بطور گسترده ای بستگی دارد به دمای استحاله. اگر آستینت درست زیر A_1 تبدیل شود، آهسته تجزیه خواهد شد. سپس محصول ممکن است نسبتاً حاوی کربیدهای کروی زبر یا پیرلیت با کربید زیر ورقه‌ای باشد، بسته به ترکیب فولاد و دمای آستینی شدن.

این محصول، تمایل دارد که بسیار نرم باشد. با این حال، اگر حداکثر نرمی مد نظر باشد، آهنگ آهسته تبدیل در دماهای درست زیر A_1 ، ضرورت نگهداری طولانی در عملیات همدمای آهنگ‌های خنک‌سازی بسیار کند را ایجاب می‌کند. فرایندهای همدمای نسبت به فرایندهایی با آهنگ خنک کردن آهسته برای دستیابی به ساختارهای مطلوب و نرم در حداقل زمان مفید مناسبت رمی باشند.

گاهی اوقات، با توجه به ابزار موجود یا جرم قسمت فولادی که آنیل می‌شود ممکن است خنک شدن پیوسته و کند که بهترین جایگزین است اتخاذ شود. همینکه دمای استحاله کاهش می‌یابد، آستینت قاعداً سریع‌تر منحل می‌شود و محصول این استحاله، سخت‌تر ورقه‌ای‌تر و زبرتر نسبت به محصولی که در زیر A_1 تشکیل می‌شود است.

درپایین‌تر از دماهای تبدیل، محصول به مخلوطی سخت‌تر از فزیت و کربید تبدیل شده و زمان لازم برای تکمیل استحاله همدمای ممکن است باز هم

افزایش بیايد. نمودارهاي زمان دما كه پيشرفت
تبدیل آستنیت را تحت شرایط همدم (IT) یا تبدیل
خنكسازي پیوسته (CCT) برای بسیاری فولادها نشان
میدهند. بطور وسیعی منتشر شده اند (مراجع 3 و
4) و اصولی را به تصویر میکشند كه در حال حاضر
مورد بحث قرار می گیرند. دیاگرام های IT یا
CCT ممكن است در طراحی فرایندهای آنیلینگ بخشی
برای رده های مختلف فولادها سودمند باشند اما
مفیدبودن آنها محدود است چون اكثر دیاگرام های
منتشر شده تبدیل را از يك شرایط نسبتاً كامل
آستینیت همگن شده ارائه می کنند كه در آنیلینگ
همواره مطلب دست یافتنی نیست. با این حال،
دیاگرام های تبدیل (IT یا CCT) كه خنكسازي را
از فرایندهای آستینیتی كردن خاص ارائه می كند
ممكن است با استفاده از تکنیکهای تشریح شده در
مرجع 1 توسعه یابند. چنین دیاگرام هایی اطلاعات
لازم را برای طراحی زمانبندی آنیلینگ مؤثر فراهم
می آورند.

خنكسازي پس از استحاله
پس از استحاله كامل آستینیت، پیامدهای
متالوژیکی می تواند در طول خنكسازي تا دمای
اتاق رخ دهد. خنكسازي بیش از حد كند ممكن است
قدری تجمع كاربیدها و در نتیجه قدری نرم شدگی

اندك فولاد را موجب شده ، اما چنين خنكسازي كندي درتبدیل اذماهاي بالا كم تأثیرتر است ۱ .
 بنابراین هیچ دلیل متالوژیکی ب رای خنك شدن آهسته پس از آنکه استحاله تکمیل شد وجود ندارد پس می توان فولاد را از دمای تبدیل تا معقولترین حالت سریع خنك کرد تا کل زمان لازم برای عملیات به حداقل برسد . اگر دگرگونی توسط خنك کردن آهسته و پیوسته انجام گردیده باشد ، بسته به ویژگیهای استحاله ای فولاد دمایی که در آن سرد کردن کنترل شده ممکن است متوقف شود . با این حال توده فولاد یا نیاز به جلوگیری از اکسیداسیون و یا ملاحظات عملی دارد و ممکن است نیازمند خنكسازي مجدد باشند که در زیر دمایی که دگرگونی آستنیت تمام می شود انجام می گیرد .
 تأثیرساختار پیشین

اگر چه كاربیدها در ساختار پیشین ریزتر و یکنواختتر توزیع شده اند ، اما آهنگی که تحت آن آستینیت شکل یافته بالای A_1 کاملاً همگن خواهد شد سریعتر است . بنابراین ساختار پیشین می تواند آنیلینگ را تحت تأثیر قرار دهد . وقتی كاربیدهای کروی در ساختار آنیل شده مطلوب باشند ، پیش گرم کردن در دماهایی درست بالای A_1 گاهی اوقات كاربیدهای پیشین را مجتمع ساخته ، مقاومتشان را نسبت به انحلال در آستینیت در گرمادهی بعدی می افزاید . حضور كاربیدهای حل

نشده با گرادیان‌های غلظت در آستینت شکل‌گیری یک ساختار کروی را بجای لایه‌ای زمانی که آستینت دگرگون شود تشویق می‌کند. پیش‌گرمای دادن برای تقویت کروی شدن عمدتاً برای فولادهای هیپوآوتکتوئید عملی است اما برای برخی فولادهای کم‌آلیاژ و هیپوآوتکتوئید هم سودمند است.

زمان آستینتی کردن فولاد کاملاً نرم فولادهای هایپراوتکتوئید را می‌توان با نگهداری طولانی در دمای آستینتی کردن، به‌نهایت نرم کرد. گرچه زمان تحت دمای آستینتی شدن ممکن است فقط اثر کمی روی سختی حقیقی داشته باشد (نظیر تغییر از 241 به 239 HB) اما اثر آن روی قابلیت ماشین‌کاری یا ویژگی‌های شکل‌دهی سرد ممکن است محسوس باشد.

آستینتی کردن طولانی در فولادهای هایپراوتکتوئید مؤثرتر است چرا که کاربیدهای باقی‌مانده در آستینت را مجتمع می‌کند. کاربیدهای ریزتر محصول نهایی نرم‌تری را تولید می‌کنند. در فولادهای با کربن کم‌تر، کاربیدها در دمای بالای A_1 ناپایدار بوده و میل دارند که در آستینت حل شوند گرچه انحلال آنها ممکن است کند باشد.

فولادهایی که تقریباً محتوی کربن اوتکتوئید هستند، اگر برای مدت‌های زمانی طولانی آستینتی

شده باشند عموماً محصول تبدیلی ورقه ای را ایجاد می کنند ، نگهداری بلند مدت در دمایی درست بالای دمای A_1 ممکن است به همان اندازه در انحلال کربیدها و زایل شدن گرادیان های غلظت کربن مؤثر باشند که نگهداری کوتاه مدت در دمایی بالاتر دارد.

دستورالعمل ها برای آنیلینگ

اصول متالوژیک شرح داده شده در فوق Payson

(مراجع 1) در قالب قواعد ذیل گنجانده شده اند که ممکن است به صورت دستورالعمل هایی برای توسعه زمان بندی های موفق و کار آمد آنیلینگ مورد استفاده قرار گیرد:

قاعدة 1: هر چه ساختار فولاد آستینتی شده همگن تر باشد ساختار فولاد آنیل شده بطور کامل تري ورقه اي خواهد بود. برعکس هر چه ساختار فولاد آستینتی شده ناهمسان گتر باشد، ساختار کربیدی استحکام یافته تقریباً گردتر خواهد بود.

قاعدة 2: نرم ترین شرایط در فولاد معمولاً توسط آستینتی شدن در دمای کمتر از 56 درجه سلسیوس (100 درجه فارنهایت) بالای A_1 و تبدیل در دمایی

(معمولاً) کمتر از 56 درجه سلسیوس (100 درجه فارنهایت) زیر A_1 توسعه می‌یابد.

قاعده 3: از آنجا که زمان‌های بسیار بلندی ممکن است برای تبدیل کامل در دماهای کمتر از 56 درجه سلسیوس زیر A_1 (100 درجه فارنهایت) لازم باشد، اجازه دهید که اکثر دگرگونی در دمایی بالاتر رخ دهد که در آن هنگام محصولی نرم شکل می‌گیرد و دگرگونی را در دمایی پایین تر خاتمه دهید که در آن هنگام زمان لازم جهت تکمیل دگرگونی کوتاه است.

قاعده 4: پس از آستینتی شد فولاد، تا حد بهینه تا حد دمایی تبدیل به سرعت سرد کنید تا مدت کامل عملکرد آنیلینگ را به حداقل برسانید.

قاعده 5: پس از آن که فولاد کاملاً تبدیل شد، تحت دمایی که ریز ساختار و سختی مطلوب را ایجاد می‌کند، تا حد بهینه به سرعت تا دمایی اتاق خنک کنید تا زمان کل آنیلینگ را باز هم بکاهید.

قاعده 6: جهت تضمین وجود حداقلی پرلیت ورقه‌ای در ساختار فولادهای ابزارآنی آنیل یافته با 0/7 تا 0/9% کربن و دیگر فولادهای کم آلیاژ با کربن متوسط، ساعت‌ها در دمایی حدود 28 درجه سلسیوس

(50 درجه فارنهایت) زیر دمای بحرانی پایین ی
(A_1) قبل از آستینتی کردن و طبق معمول ، پیش
گرما دهید.

قاعده 7: جهت کسب حداقل سختی در فولادها ابزاری
هیپراوتکتوئید استحکام یافته، در دمای آستینتی
کردن به مدتی طولانی (حدود 10 تا 15 ساعت) گرما
بخشید، سپس طبق معمول تبدیل نمایید.
این قوانین زمانی به مؤثرترین نحو اعمال
میشوند که ویژگیهای تبدیل و دماهای بحرانی
فولاد تثبیت شده باشند و زمانی که استحاله توسط
فرایندهای همدمای عملی باشد.

دماهای آنیلینگ
برای بسیاری از کاربردهای آنیل کافی است که
صرفاً معین داشت که فولاد در کوره از یک دمای
آنیل تخصیص یافته (آستینتی کردن) خنک گردد .
دماها و سختی برینل برای آنیلینگ فولادهای
کربنی در جدول 2 ارائه شده اند و داده های مشابه
برای فولادهای آلیاژی در جدول 3 ارائه شده اند.
(جدول 2-دماها و سیکل خنک کردن برای آنیلینگ
کامل فولادهای کار شده کم کربن)

(نمودار 3-سیکل خنک کردن و حرارت دهی جهت فرایند آنیلینگ صفحات و کوپلهای از صفحات کم کربن)

چرخه های گرم کردن که جهت محدوده های دماهای آستینتی شدنی در انتها و ابتدا به کار می گیرند در جدول سه ارائه شده اند، که به ساختارهای پرلیتی منجر شوند.

ساختارهای غالب کروی شده زمانی حاصل شوند که دماهای پایین تری به کار رود. وقتی که فولاد آلیاژی آنیل می شود تا ریز ساختاری خاصی را کسب کند دقت بیشتری به تعیین دماها و شرایط خنک سازی در فرایند آنیل لازم است. جدول 4 زمان بندی های خاص را برای عملیات آنیل برای تنوعی از فولادهای آلیاژی استاندارد ارائه می کند.

در آنیل همدمما برای تولید ساختاری پرلیتی بالاخص در فورجینگ، آستنیته کردن در 70 درجه سلسیوس (125 فارنهایت) بالاتر از آنچه در جدول 4 ارائه شده ممکن است اختیار شود تا زمان آستینتی شدن را بکاهد.

برای اکثر فولادها آنطور که در جدول 4 نشان داده شده است، آنیلینگ ممکن است با گرمابخشی تا دمایی آستینتی شدن همراه باشد و سپس یا (الف) خنک سازی در کوره تحت آهنگ کنترل شده یا (ب)

خنک‌سازی سریع و نگهداری دما در دمای پایین تر جهت تبدیل همدما. هر دو رویه عملاً به همان سختی می‌انجامند، با این تفاوت که به طور چشمگیری زمان کمتری برای تبدیل همدما لازم است.

یکنواختی دما

يك عامل بالقوه به ناکامی عملیات آنیل کردن فقدان اطلاع از توزیع دما در بار فولاد در کوره است. کوره‌هایی که به حد کافی بزرگ باشند که 18 تن (20 تن) فولاد را بطور همزمان آنیل کنند متداول نیستند. هرچه کوره بزرگتر باشد، تثبیت و حفظ یکنواختی دمای فولاد در طی گرم کردن یا خنک کردن سخت تر است.

ترموکوپل‌های کوره نشان‌دهنده دمای فضای فوق، زیر یا نزدیک بار هستند اما این دما ممکن است به میزان 28 درجه سلسیوس (50 درجه فارنهایت) یا بیشتر از دمای خود فولاد (شکل 3 را ببینید) تفاوت داشته باشند بالاخص وقتی فولاد در يك لوله یا جعبه است یا وقتی میله یا نوار در باری جوی ساکن بسته‌بندی شده باشد. وقتی این شرایط موجود باشند، توزیع دما در سراسر بار در طول گرم کردن و خنک‌سازی بایستی با گذاشتن ترموکوپل‌ها در میان میله‌ها، ساخته‌ها یا پیچه‌ها تثبیت گردد. تنظیم کوره در طول عملیات آنیلینگ بایستی براساس دماهایی باشد که توسط این ترموکوپل‌هایی

مشخص شده است که در تماس واقعی با فولاد هستند تا دماهایی که توسط ترموکوپل های کوره مشخص شده اند.

جدول 3- دماهای استحکام بخشی توصیه شده برای فولادهای آلیاژی (خنک سازی کوره ای)

کروی سازی

فولادها ممکن است دچار کرویت شوند- یعنی گرم و خنک شوند تا ساختاری از کربیدهای گویچه ای را در زمینه ای فزینی ایجاد کنند- توسط روشهای ذیل:

- 1- حفظ طولانی در دمایی زیر A_{e1}
- 2- گرم کردن و خنک ساختن متناوب بین دماهایی که درست بالای A_{c1} و درست زیر A_{c1} هستند.
- 3- گرم کردن تا دمایی A_{c1} و سپس خنک کردن بسیار کند در کوره و یا نگهداری در دمای درست زیر A_{c1}
- 4- خنک ساختن تحت آهنگی مناسب از حداقل دمایی که در آن کل کربیدها حل می گردن د جهت جلوگیری از شکلگیری مجدد یک شبکه کربید و سپس گرم کردن مجدد بر طبق روش 1 یا 2 از فوق (قابل اعمال به فولاد ه ایپراوکتوئید حاوی یک شبکه کربید)

آهنگ کروی شدن توسط این روش‌ها تا حدی بستگی دارد به ریز ساختار پیشین، که عمده ترین مورد برای ساختارخنک شده ای است که در آنها کربید ریز و متفرق وجود دارد. کارسرد انجام شده قبلی هم آهنگ واکنش کروی شدن را در یک فرایند زیر بحرانی کروی کننده می افزاید.

برای کروی کردن کامل، دماهای آستینتی کردن بالای دمای Ac_1 یا حدود حد فاصل بین Ac_1 و Ac_3 به کار می روند. اگر دما اندک ی بالای Ac_1 قرار است به کار رود، ویژگیهای بارگذاری خوب و کنترل دمای دقیقی برای بدست آوردن نتایج صحیح لازم می باشد؛ در غیر این صورت قابل تصور است که Ac_1 ممکن نیست حاصل شود و لذا آستینتی شدن ممکن نیست رخ دهد. از آنجا که زمان و دما بر آستینته شدن تأثیر گذاشته و همچنین بر تعداد کربیدهای نامحلول و تشکیل هسته و ادغام اشکال کروی مانند نیز اثر می گذارد، کنترل دقیق دما لازم است. به عنوان مثال: اگر تصمیم بر آن شود کروی شدن فولاد مفروض نیازمند دمای آستینتی شدن 750 درجه سلسیوس (1385 درجه فارنهایت) باشد، یک انحراف 11 درجه سانتیگرادی (20 درجه فارنهایتی) ممکن است به سادگی به ساختاری ناقص کروی مانند منجر شود.

ساختار کروی شده زمانی مطلوب است که حداقل سختی، حداکثر چکش خواری یا (برای فولادهای

پرکربن) حداکثر قابلیت ماشین کاری شدن مهم باشد. فولادهای کم کربن به ندرت برای ایجاد قابلیت ماشین کاری کروی می شوند، چون در شرایط کروی شده، بیش از حد نرم بوده و چسبنده اند و بسختی بابراده های بلند برش میخورند. فولادهای کم کربن عموماً جهت ایجاد امکان تغییر شکل شدید کروی شوند. مثلاً، وقتی لوله فولادی 1020 توسط کشش سرد در دو یا سه مرحله تولید می شود، آمد اگر ماده به مدت نیم تا 1 ساعت در 690 درجه سلسیوس (1275 درجه فارنهایت) پس از مرحله آنیل گردد ساختاری کروی به وجود خواهد. محصول نهایی سختی در حدود 163HB خواهد داشت. لوله در این شرایط قادر خواهد بود که در مقابل تغییر شکل شدید در طول شکل گیری سرد متوالی مقاومت کند. از جمله دیگر اقسام فرایندهای گرمایی، سخت کردن پس از کروی شدن بستگی دارد به محتوای کربن و آلیاژی. افزایش کربن محتوای آلیاژی یا هر دو منجر به افزایش در سختی ساختار کروی یافته می شود که عموماً گستره ای از 163 تا 212HB (جدول 4) دارد.

پروسه ای آنیلینگ:

ار آنجایی که سختی فولاد در کار سرد افزایش می‌یابد، چکش خواری کاهش یافته بنابراین تغییر شکل سرد آنقدر دشوار می‌گردد که ماده بایستی آنیل گردد تا چکش‌خواری اش را بازیابد. به چنین آنیلینگی که میان مراحل پروسه انجام می‌گیرد، آنیلینگ «درون پروسه» یا همان پروسه آنیلینگ گفته می‌شود. که ممکن است تشکیل شده از هر گونه فرایند متناسبی باشد. در اکثر موارد یک فرایند زیر بحرانی کافی و دارای کمترین هزینه است و عبارت «آنیلینگ پروسه ای» بدون توصیف بیشتر معمولاً به یک پروسه آنیلینگ زیر بحرانی، اطلاق می‌گردد. غالباً پروسه‌ای آنیل برای قطعاتی معینی که با کوبیدن یا پتک زنی بصورت سرد شکل یافته اند ضرورت دارد. فولادهای گرم کار شده پرکربن و آلیاژی هم آنیل می‌شوند تا جلوی ترک خوردگی آنها گرفته شده و آنها را برای برش پیچش یا صاف کردن نرم کرد.

جدول 4- دماهای توصیه شده و چرخه‌های زمانی برای استحکام بخشی فولادهای آلیاژی

پروسه آنیل معمولاً متشکل از گرما دادن تا دمایی زیر Ae_1 ، نگاهداشتن به مدتی مناسب و سپس خنک کردن معمولاً در هوا. در بیشتر حالات حرارت

دادن دردمایي بين 11 و 22 درجه سانتیگراد (20 و 40 درجه فارانهایت) زیر Ae_1 بهترین ترکیب از ساختار، سختی و خواص مکانیکی را ایجاد می کند. کنترل دما تنها نیازمند مانع شدن از گرما دادن قطعه بالای Ae_1 و سپس نیل به اهداف آنیل است. در صنایع سیم سازی پروسه آنیل در بین مرحله کشش سیم از کمی بزرگتر از اندازه مطلوب نهایی و کشش جهت رسیدن به اندازه نهایی به طور متوسط کاربرد دارد. بنابراین ساختن سیم نیاز به اطلاعات پروسه آنیل سیم دارد. بنا براین پروسه آنیل جهت تولید سیمهای به اندازه کافی نرم برای منقلب کردن و ایجاد امکان کشش با اندازه کم در سیمهای فولادی کم کربن و میان کربن که نمی توان آنها را به اندازه کم به طور مستقیم از رولهای گرم کشید مورد استفاده قرار می گیرد. - سازگار ماندن با طراحی های بحرانی دشوار است. هنگامی که بحث از گرم کردن همراه با نگهداری طولانی است، دماهای بحرانی مورد نظر بایستی دماهای متوازن Ae_1 و Ae_3 باشند. اصطلاح شناسی در بحث هایی از گرم کردن و خنک سازی تحت آهنگ های معین نشده و برای زمانهای نگهداشت نامعین، اختیاری اند.

فولاد در کوره تحت آهنگ معین شده از طریق گستره دمایی نشان داده شده خنک می گردد. (b)

فولاد به سرعت به دمایی خنک می‌شود که نشان داده شده و به مدت زمان معین شده در آن دما نگهداری می‌گردد، استحکام بخشی هم‌دما برای کسب ساختار پرلیتی، فولادها ممکن است در دماهای بالاتر تا 70 درجه سلسیوس (125 درجه فارنهایت) بالاتر از دماهای فهرست شده آستینتی گردد. (d) به ندرت استحکام بخشی توسط فرایند مرسوم خنک سازی پیوسته کند غیرتحملي است. دمای تبدیل پایین تر به طور مشخص دچار رکود است و چرخه های به طور بیش از حد بلند خنک سازی لازم اند تا تبدیل به پرلیت را حاصل کنند. (f) ساختارهای غالباً پرلیتی به ندرت در این فولاد مطلوب اند.

پروسه ای آنیلینگ رضایت بخش تر از آنیل کروی سازی برای یک ماده است، زیرا ترکیب ی از یا اندازه (یا هر دو)، نمی‌تواند به اندازه ای تمام شده کشیده شود چون باعث کاهش چکش خواری می شود یا خواص فیزیکی را برآورد ه نمی‌کند. همچنین ماده ای که در طول فرایند بطور سرد برش خورده است، مورد آنیل قرار می‌گیرد تا چکش خواری سطح برش خورده را تا حدی مناسب جهت عملیات های بیشتر افزایش دهد.

مثالها : تغییرات بر روی ماده آنیل شده

لازم بود تا بر مشکلات ساخت در دو عملیات تولید فولادهای 1040 و 1045 بتوان غلبه نمود. فولاد 1040

کروی شده برای برش سرد بسیار نرم بود و وقتی فولاد 1045 کروی شده به صورت میله های ضربتی کارسرد شد ه بود، مشکلات ماشینکاری شدن به خاطر هزینه بالا و دنده ای بودن بسیار بالا بود. بهر حال يك ماده کروی شده ممکن است به خاطر توالی یا شدت عملیات شکل دهی یا به خاطر ویژگیهای مطلوب مکانیکی در پایان تولید به آنیل نیاز داشته باشد. بنابراین جهت رفع ترك های توسعه یافته در فرایند آنیل فولاد 1035 در طول عملیات کار سرد جهت تولید انبوه پیچهای واگ نهایی حمل و نقل ، حداکثر چکشخواری مورد نیاز توسط کروی سازی ایجاد می شود. در عملیات دیگری درمورد فولاد 1038، کروی سازی مورد نیاز انجام شد تا سختی محصول نهایی در گستره معین 78 تا 88 HRB باشد.

ساختار آنیل یافته جهت ایجاد قابلیت ماشینکاری: ساختارها و سختی های مختلف دارای قابلیت ماشینکاری مختلفی هستند . مثلاً، شکل 4 نشان دهنده میله از جنس فولاد 5160 که بطور جزیی کروی شده و توسط ابزاری با فرسایش بسیار کم و سطح تمام کاری بهتر ماشینکاری شده است که نسبت به همان فولاد که در شرایط آنیل شده دارای ریز ساختار پرلیتی با سختی بیشتر است . براساس بسیاری مشاهدات ریز ساختار بهینه برای

فولادهای دارای ماشین کاری شونده دارای دامنه کربن ترکیبی متفاوت است که معمولاً به قرار ذیل هستند:

ریز ساختار بهینه	کربن، %
بصورت رول شده (اقتصادی ترین)	0/06 تا 0/2
زیر قطر 75 میلیمتر (3 اینچ)، نرمالیزه قطر 75 میلیمتر به بالا، بصورت رول شده	0/2 تا 0/3
استحکام بخشی شده، جهت تولید پیرلیت زبر حداقل مزیت	0/3 تا 0/4
پیرلیت ورقه ای زبر تا سفروئیدیت زبر	0/4 تا 0/6
100% سفروئیدیت، زبر تا نرم	0/6 تا 1

نوع عملیات ماشین کاری هم یک عامل است. مثلاً دنده های ساخته شده برمیله فولاد 5160 که دوبار عملیات ماشین کاری توسط ماشینهای خودکار پیچکاری و سوراخ کاری ایجاد شدند. عملیات ماشینکاری پیچکاری از ماده کاملاً کروی شده ساده تر بود اما ساختاری پرلیتی جهت سوراخ کاری مناسب تر بود. ساختاری نیمه کروی شده، رضایتبخش به نظر می رسید.

ساختارهای نیمه کروبی شده را می‌توان با آستنیتی کردن در دماهای کمتر و گاهی اوقات در آهنگهای سریع خنک‌سازی در آنهایی که برای سوق به ساختارهای پرلیتی به کار می‌روند حاصل می‌شود. ساختار نیمه کروبی شده میله فولاد 5160 که در فوق ذکر شد با حرارت‌دهی تا 790 درجه سلسیوس (1450 فارنهایت) و خنک‌سازی تحت 28 درجه سلسیوس در ساعت (50 فارنهایت در ساعت) تا 650 درجه سلسیوس (1200 فارنهایت) حاصل شده است. برای این فولاد، آستنیتی کردن تحت دمایی حدود 775 درجه سلسیوس (1425 فارنهایت) منجر می‌شود به ساختاری با فریت بیشتر و پرلیت کمتر. کروبی کردن کامل فولادهای با کربن متوسط از فولادهای پر کربن نظیر 1095 و 52100 بسیار دشوارتر است. در غیاب کاربیدهای اضافی تشکیل و ترویج واکنش کروبی‌سازی، دستیابی این ساختارها به پرلیت کامل آزاد در چرخه‌های فرایندهای گرم‌ای عملی دشوارتر است. در سطوحی با کربن کمتر، ساختار حاوی دسته‌های پرلیتی زیر در زمینه‌ای از فریت است که غالباً باعث افزایش قابلیت ماشین‌کاری می‌شود. در برخی از فولادهای آلیاژی این نوع از ساختار می‌تواند به بهترین وجه با گرم کردن تا دماهایی بالای Ac_3 حاصل شود تا اندازه دانه آستنیتی ریز گردد سپس نگهداشتن

زیر Ar_1 تا اجازه دهند که پرلیت زبر و لایه ای شکل بگیرد. به این فرایند گاهی اوقات آنیل چرخه ای یا آنیل لایه ای گفته می شود. مثلاً دنده های ساخته شده از فولاد 4620 به سرعت در پنج ناحیه از کوره تا دمای 980 درجه سلسیوس (1800 فارنهایت) گرم شده سپس در ناحیه خنک سازی با آب تا 625 الی 640 سلسیوس (1160 تا 1180 فارنهایت) خنک سازی شدند و در آن دما به مدت 120 الی 150 دقیقه نگهداری می شوند. ساختار حاصله - پرلیت زبر لایه ای در زمینه ای از فریت - که دارای سختی از 140 تا 146 HB بود. (مرجع 5).

اقسام کوره ها

کوره های استحکام بخشی از دو نوع عمده اند : کوره های تک بار و کوره های پیوسته . در خود همین دو دسته کوره ها را می توان باز هم براساس شکل و شمایل، نوع سوخت مصرفی، روش اعمال گرما و روشهایی که توسط آنها بار در کوره جابجا می شود یا پشتیبانی می گردد، دسته بندی کرد. سایر عواملی را که بایستی در انتخاب کوره لحاظ کرد عبارتند از هزینه، نوع چرخه آنیل، اتمسفر لازم و ماهیت فیزیکی اجزایی که قرار است آنیل شوند. در بسیاری از موارد، با این حال چرخه آنیل بکار رفته توسط ابزار موجود صورت می گردد.

کوره های از نوع تک پخت بر روی اجزای بزرگ نظیر قطعات ساخته شده سنگین لازمند و اغلب برای

تکه‌های کوچک یا برخی از فولادها و برای اقسام فولادهای آلیاژی پیچیده چرخه‌های بلند مدت ترجیح داده می‌شوند. انواع خاص کوره‌های تک پخت شامل کوره‌های اربابه‌ای، جعبه‌ای، هستند. این کوره‌ها ممکن است بصورت دستی کنترل شده یا ممکن است مجهز به کنترل‌گرهای برنامه‌ریزی شده باشند که امکان انجام عملیات‌های خودکار را می‌دهند. کوره‌های پیوسته از جمله اقسام با اجاق گردان، با اجاق برشی چرخشی و کششی برای آنیل همدمای مقادیر عظیم اجزاء فولادی که دارای یک محدوده هستند، ایده‌آل می‌باشند. این کوره‌ها را می‌توان با نواحی منفرد متعددی طراحی کرد که اجازه می‌دهند کار بطور متوالی به دما رسیده، در آن دما نگه داشته شده و تحت آهنگ مطلوب خنک گردد.

جهت بحث‌م‌شروح اقسام کوره‌هایی که برای آنیل موجودند، مرجع شماره 6 را ملاحظه کنید.

جو کوره

کوره‌های الکتریکی به کار رفته توسط اتمسفرهای هوا و کوره‌های بکارگرفته شده توسط جو متشکل از فرآورده‌های احتراقی، را نمی‌توان برای دفع کامل اکسیداسیون فولادی که در حین فرایند است به کار برد. تنها اتمسفرهای مستقل از سوخت عموماً برای آنیل پاک یا براق رضایت‌بخش

تلقی می شوند. اکسیداسیون بیش از حد در طول آنیل معمولاً با استفاده از اتمسفرهای کنترل شده مناسب در کوره مورد نظر که طوری طراحی شده اند تعدیل یافته از هوا و گازهای سوختی حاصل از محفظه گرمادهی است، اجتناب پذیر می شود.

گازها و مخلوطهای گازی به کار رفته برای اتمسفرهای کنترل شده به فلزی که تحت فرایند قرار می گیرد، دمای فرایند و شرایط سطح اجزایی که آنیل می شوند بستگی دارد. ضرورت حذف کربن زدایی به علاوه اکسیداسیون غالباً عاملی مهم در انتخاب اتمسفرهای آنیل است.

گازی که بیشتر از همه به عنوان اتمسفر حفاظتی جهت آنیلینگ استفاده می شود، گاز اگزوترمیک است (حرارتزا) است. این گاز ارزان است، مواد خام جهت تولید آن به راحتی موجودند و نتایج حاصل شده از آن عموماً عالی اند. گازهای نیدروکربن نظیر گازهای طبیعی، پروپان، بوتان گاز اجاق کک به طور معمول در یک تولیدکننده گاز اگزوترمیک (حرارتزا) سوخته و یک معادله احتراق خود به خود و حرارتزا را ایجاد می کند.

یک مخلوط گاز حرارتزا که معمولاً استفاده می شود حاوی $5\% H_2$ ، $10\% CO$ ، $5\% CO_2$ ، $1\% CH_4$ و $69\% N_2$ است.

این گاز برای آنیلینگ درخشان نوار فولاد کم کربن سرد رول شده به کار می رود. با این حال به خاطر دی اکسیدکربن و بخار آبی که داراست

فولادهای پر کربن و دارای کربن متوسط را کربن زدایی می کند.

گاهی اوقات گاز اگزوترمیک (حرارت زا) سرد می شود تا رطوبت محتوی آن کاسته شود بالاخص در برخی نواحی جغرافیایی که دمای آبی که برای خنک سازی به کار می رود، بالاست. وقتی که از کربن زدایی سطوح قطعه باید اجتناب کرد، می بایست بخار آب و دی اکسید کربن را کاملاً از گاز جدا ساخت. گاز تخلیص شده اگزوترمیک (حرارت زا) در حالیکه بخار آب و دی اکسید کربن حذف شده باشد، در فرایندهای بدون کربن زدایی فولاد کاربردهای بسیاری دارد.

گاز حرارت زای غنی و تخلیص شده که توسط ترکیبات جزئی تشکیل یافته است، برای چرخه کوتاه آنیل و پروسه های آنیل فولادهای با کربن زیاد و متوسط از نوع کربن معمولی و آلیاژی به کار می رود. جهت آنیل تک پخت و بلند مدت، وجود این گاز نامناسب است، به خاطر محتوایی بالای مونواکسید کربن منجر به رسوب دوده های روی کار شده که احتمال خوردگی سطح را به عنوان پیامدی از زمان نسبتاً طولانی کار در گستره دمای بحرانی پایین افزایش می دهد که این در اثر واکنشهای گازی می توانند رخ دهد. در چرخه کوتاه آنیل، این اثرات حداقل بوده و گاز CO به خاطر پتانسیل پرکربن خویش مطلوب است. گاز نسبتاً

خالص شدة شكل گرفته توسط احتراق كامل بروي چرخة بلندمدت آنيل فولادهاي كربن متوسط و پر كربن از نوع فولادهاي ساده كربني و آلياژي براي آنيل تكباري و پيوسته نوارهاي فولادي كم كربن كه توسط قلع روکش دهی می شوند به کار می رود. سایر اتمسفرهایی که معمولاً در آنیلینگ به کار می روند مشتمل اند بر آندوترمیک، آمونیاک تفکیک شده، خلاء و اتمسفرهاي بين نيتروژن که تشکیل شده از نيتروژن اضافه افزودنيهاي نظير ئيدروژن، متانول و مونوکسید کربن می باشند که جهت کسب اطلاعات جامع تر مقالة راجع به اتمسفر کوره در همین مجموعه را ملاحظه کنید.

آنیلینگ ورقه و نوار با توجه به تناژ کل ماده تحت فرایند آنیل کردن، ورقه و صفحات در طول تولید محصولات نور د فولادي بیانگر کاربرد فراوان آنیل است. چنین آنيلي به آن خاطر انجام می شود تا ماده برای عملیات بیشتر مهیا شود (از قبیل رول کردن سرد اضافي یا ساختن بصورت قطعات) و از آنجا که دماهاي به کار گرفته شده معمولاً زیر دمای A_1 هستند عبارات خاص تر «آنیل زیر بحرانی» و «آنیل پروسه ای» مناسباند اگر چه کاربرد متداول اول استفاده از واژه «آنیل» بدون قید و شرط است.

در آنیل ورقه و نوار، اغلب دو تکنیک استفاده می‌شوند: فرایند تک پخت و فرایند پیوسته. در فرایند تک پخت که «آنیلینگ جعبه ای» هم نام دارد رولها یا طولهای بریده شده از صفحه در یک محیط آنیل نهاده شده و توسط محفظه‌هایی پوشیده می‌شود که بسته شده اند تا اتمسفر را حفظ کنند. کوره ای سپس روی فولاد پوشیده شده نهاده می‌شود. اتمسفری محافظتی درون پوششهای داخلی نهاده می شود تا فولاد را از اکسید شدن حفاظت نماید و با استفاده از پروانه ها و صفحات همرفتی در میان کوئلها به گردش در می‌آید. گرمابخشی توسط کوره خارجی فراهم شده و ممکن است از طریق لوله های تابشی یا با احتراق مستقیم صورت پذیرد. بارتا دمای لازم گرم شده و برای مدت زمانی در آن نگهداری می‌شود که منجر به کسب خواص مطلوب شود. کوره خارجی سپس حذف شده و به کوئلها امکان داده می‌شود که تحت پوششهای خارجی خنک شوند. وقتی دما به نقطه ای کاهش یافته باشد که در آن اکسیداسیون فولاد رخ ندهد، پوشش های داخلی برداشته شده و فولاد جهت پردازش بیشتر به پیش رانده می شود.

در عملیتهای پیوسته، کوئلهای فولادی از حالت پیچوار در آمده و از در یک کوره کشیده می‌شوند که در آنجا آنها در معرض چرخه آنیل تحت یک

اتمسفر حفاظتي قرار دارند. پس از آنکه ورقه يا نوار خنك شده و از كوره در آورده شد، پرداخت بيشتر در خط توليد (نظير گالوانيزه كردن داغ و عمقي) ممكن است انجام شود، يا فولاد ممكن است به صورت ورقه‌هايي بريده شود. با اين حال كل فولاد مجدداً پيچ خورده و سپس در فرايند كوره هاي تكباري به پيش رانده مي‌شود.

علاوه بر تفاوتهاي ظاهري در ابعاد، فرايند تكباري و پيوسته بطور قابل ملاحظه اي از جنبه ديگرنيز متفاوتند. آنيل تك باري ممكن است تا يك هفته به طول انجامد به خاطر آنكه توده عظيمي از مواد تحت فرايند قرار دارند در حالي كه آنيل مداوم در حدود 5 دقيقه انجام مي‌گردد.

تفاوتها همچنين در دماهاي به كار رفته نيز مشهودند در حاليكه فرايند تكباري عموماً در دماهاي پايين‌تري انجام مي‌شوند. از آنجا كه آنيل تكباري مطمئن بودن از يكسان بودن دما در سراسر بار (كه ممكن است متشكل از چند صد تن فولاد باشد) دشوار است، فرايند مداوم، پتانسيل بيشتري براي ايجاد خواص يكنواختتر را داراست.

زمان‌هاي کوتاه آنيل مداوم غالباً به سطح با اندكي سختي بالاتر از موارد مشابه آنيل توسط فرايند تكباري منجر مي‌شود.

رول کردن سرد صفحات و ورقه های ساده کربنی:

روش معمول تولید سرد ورق و صفحه تولید یک پیچۀ داغ رول شده در آب نمک نهاد ه شده جهت برطرف ساختن جرم ها (اکسید) و سرد کردن رول تا اندازه مقداری که مد نظر است. رول کردن سرد ممکن است تا مقدار 90% از ضخامت ماده داغ رول شده را بکاهد که سختی و مقاومت فولاد را افزوده اما به شدت چکش خواری اش را می کاهد. اگر قرار باشد که هرمیزان کار سرد انجام شود، چکش خواری فولاد نیز می بایست بازیابی شود. آنیلینگ فولاد سرد رول شده بطور معمول برای تولید ریز ساختار با بلورهای فریتی از ماده طویل شده تحت تنش که از کار سرد حاصل شده طراحی شده است. در طول گرم کردن فولاد و در اولین بخش از قسمت نگهداری از چرخه اولین فرایند متالوژیکی که رخ می دهد، بازیافت است. در طول این فرایند کرنش های درونی آزاد می شوند (گرچه تغییر اندکی در ریز ساختار مشهود است). چکش خواری بطور ملایمی افزایش یافته و استحکام اندکی کاسته می شود.

در آنیل مداوم، فرایند بلوری شدن مجدد رخ می دهد و دانه های فریت جدید از دانه های طویل شده تشک یل می گردند. در طول بلوری شدن مجدد، استحکام به سرعت کاسته شده و چکش خواری افزایش می یابد، زمان و دمای بیشتر سبب می شود که برخی از دانه های تازه شکل گرفته در

مجاورت دیگر دان ها رشد کنند. این ترم را رشد دانه گویند و منجر به کاهش ناچیز در مقاومت و افزایش اندک (اما اغلب قابل توجه) در چکشخواری می شود. اکثر فولادهای ساده کربن که روی آنها فرایند آنیل اعمال می شود تمایل به تبلور مجدد کامل دارند. اما بایستی دقت کرد که جلوی رشد بیش از حد دانه گرفته شود زیرا می تواند منجر به نقایص سطحی (نیز پوست پرتقال) در اجزای شکل گرفته شود.

آهن گهایی که تحت آنها فرایندهای متالورژیک ذکر شده در فوق پیش می روند، توابعی از ترکیب شیمیایی و مشخصات فولادی است که آنیل می شود. به عنوان مثال، مقادیر اندک عناصری نظیر آلومنیوم، تیتانیوم، نوبیوم، وانادیم، مولیبدون می توانند آهنگ بلوری شدن مجدد فولاد را کند سازند و سبب می شوند که نتیجه آنیل کند شده و لذا نیاز به دماهای بیشتر با زمانهای آنیلینگ بلند مدتتری را برای کسب همان ویژگیها ایجاد کند. گرچه حضور این عناصر آلیاژی عموماً حاصل افزودنیهای آگاهانه ای است که هدف از آنها اصلاح ویژگیهای ورقه است (در صورت وجود آلومینیوم، تیتانیوم، نوبیوم و وانادیم)، برخی عناصر ممکن است به صورت عناصر باقیمانده (به عنوان مثال مولیبدوم) در مقادیری به حد کافی زیاد موجود باشند که واکنش نسبت به آنیل را

بهبود می بخشند. برعکس مقادیر زیاد کار سرد (کاهش‌های سرد بیشتر) آنیل را تسریع می کند. بنابراین اینکه یک چرخه آنیل خاص می تواند همه خواص مکانیکی را در فولادها بهبود بخش امکان‌پذیر نیست.، ترکیب شیمیایی و میزان پرداخت سرد هم بایستی لحاظ شوند.

فولادهای ساده کربنی سرد رول شده به روشهای مختلفی تولید می‌شوند. فولاد با کیفیت تجاری (CQ) چیزی است که به طور گسترده ای تولید می‌شود و مناسب است برای شکل گیری ملایم. کیفیت کشش فولاد (DQ) محدودیت‌های بیشتر ویژگی مکانیکی را برای استفاده در اجزاء شدیدتر شکل گرفته ایجاد میکند. فولاد کشته شده ویژه با کیفیت طرح (DQSK) تولید می شود تا برای شدیدترین کاربردهای شکل‌گیری مناسب باشد. ویژگیهای خاص این رده‌ها را می‌توان در صفحه 156 جلد 1 این کتاب مبانی یافت فولاد با کیفیت ساختاری (SQ) برای ویژگیهای مکانیکی معین شده غیر از آنهایی تولید می‌شود که برای سه رده فوق وجود داشت.

چرخه‌های آنیل ویژه برای تمام ترکیبات ممکنه جهت ترکیبی از، رده کاهش سرد را نمی‌توان در اینجا فهرست کرد. با این حال برای خنک‌ترین نقطه در محموله دماهای آنیل تک پخت از 620 تا 690 درجه سلسیوس (1150 تا 1270 فارنهایت) نوسان

دارد. زمان‌های فرایند همراه با درجه مطلوب و اندازه محموله نوسان می‌کنند اما کل زمان‌ها (از آغاز گرمایش تا برداشت فولاد از کوره) می‌توانند تا یک هفته به طول بی‌انجامد.

چرخه‌های آنیل مداوم مدت زمان کوتاهی در دماهای بالاتر نسبت به چرخه های آنیل تکدما داشته. در برخی کاربردها دمای آنیل ممکن است از A_1 تجاوز کند. چرخه‌های خاص 40 ثانیه در 700 سلسیوس (1290 فارنهایت) برای کیفیت فولاد تجاری سرد رول شده و 60 ثانیه در 800 سلسیوس (1470 فارنهایت) برای ورق کشته ویژه با کیفیت کششی هستند. آنیل پیوسته برای ورق سرد رول شده شامل فرایند اورایجینگ بیش‌ازحد است که طراحی شده تا کربن و نیتروژن را از محلول در فریت رسوب کرده و احتمال تداوم کرنش را می‌کاهد. پیر سازی اضافه به مدت 3 تا 5 دقیقه در 300 تا 450 سانتیگراد (570 تا 840 فارنهایت) منجر به ته نشین شدن مطلوب کربن و نیتروژن می‌شود. آنیل تکباری و آنیل مداوم در ویژگی محصولاتی که تولید می‌کنند اندکی تفاوت دارند. نمونه ایی از ویژگیهای فولاد کربن معمولی با کیفیت تجاری آنیل شده مداوم و آنیل شده تکباری به قرار ذیل‌اند:

فرایند استحکام بخشی	مقاومت تسلیم		طویل شدگی (%)
	مگا پاسکال	کیلو **** بر اینچ	
تک ذوب	210	30/4	43
پیوسته	228	33	41/7

ورق و نوار سرد رول شده پر مقاومت به خاطر ظرفیت‌های بالای بارپذیریشان اهمیت آنها در حال افزایش است. مقاومت ورق و نوار را می‌توان از طریق اصلاح ترکیب شیمیایی و یا انتخاب چرخه‌های متفاوت آنیل افزایش داد، اما این روشها منجر به چکش‌خواری کاسته شده و فولادهای ساده کربن تولید شده توسط روشهای مرسوم می‌توانند تحت شرایط آنیل مداوم و یا آنیل تکباری قرار بگیرند که احیاء یا بلوری شدن مجدد جزئی آنها را در پی دارد. نمونه ای از سیکل انیلینگ تکباری ویژه این دسته در دماهای نگره داری 425 تا 480 سلسیوس (800 تا 900 فارنهایت) و یا چندین زمان نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. فولادهای پر مقاومت کم

آلیاژ (HSLA) حاوی عناصر آلیاژی نظیر ن یوبیوم، وانادیوم و تیتانیوم هم ممکن است بصورت دسته های سرد رول شده تولید گردند. بعلاوه آلیاژسازی، فولاد گرم رول شده قویتری ایجاد می کند که حتی با رول کردن سرد نیز مستحکمتر می شود. فولادهای سرد رول شده HSLA ممکن است آنیل بازیابی شوند تا رده های بالاتر مقاومت را کسب کنند یا آنیل با تبلور مجدد شوند تا رده مقاومت پایین تر را ایجاد کنند. تولید موفق فولاد HSLA سرد رول شده نیازمند گزینشی از ترکیب مناسب فولاد و مقاومت داغ رول شده، میزان کاهش سرد و نوع چرخه آنیل می باشد. جدول 5 ارائه گر ویژگیهای خاصی پس از بهبودی یا آنیل با تبلور مجدد، هر یک که مناسب باشد، برای خانواده ای از تولیدات ورق سرد رول شده است که تیتانیوم را به عنوان عنصر اصلی استحکام بخشی به کار می گیرند.

محصولات داغ و عمیق گالوانیزه شده در خطوط تولید می شوند که کوپلهای کاملاً سخت یا از پیش آنیل شده (آنیل تکباری) را پرداخت می کنند. خطوط (تولید) برای پرداخت کوپلهای کاملاً سخت شامل یک قابلیت آنیل درون خط تولید بوده تا آنیلینگ و گالوانیزه کردن داغ عمیق بتواند با یک مرتبه عبور از میان خط (تولید) انجام شود. این آنیلینگ درون خط تولید

نظیر آنیلینگ مداوم فولاد بدون پوشش عموماً به افزایش استحکام تاحدی بیشتر و چکش‌خواری تا حدی کمتر از آنیل تک‌دما منجر می‌شود. حداکثر دمای تسمه زیر دمای A_1 برای فولاد با کیفیت تجاری هستند ولی دماهای بالاتر از 845 سلسیوس (1550 فارنهایت) برای رده‌های DQSK لازم‌اند. گالوانیزه کردن فولاد از پیش آنیل شده به ایجاد خصوصیات مشابه با خصوصیات ماده گالوانیزه نشده منجر می‌شود.

اتمسفر درون یک خط گالوانیزه کننده پیوسته علاوه بر حفظ ورق از اکسیداسیون بایستی هر گونه اکسید حاضر روی تسمه راه از دوده تا پیوند متالوژیک میان فولاد و روی را حذف نماید.

فرآورده‌های نورد در قلع

نسبت به ورقه‌های سرد رول شده همتای خود در واقع اندازه‌ای نازک‌تر تولید می‌شوند (0/13 تا 0/38 میلیمتر، یا 0/005 تا 0/015 اینچ) و به واقع برخی از آنها توسط قلع یا کرم یا اکسید کرم برای مقاومت در برابر خوردگی پوشش داده می‌شوند. ترتیب به کار رفته شده برای پروسه‌های منفرد کاهش قلع ورقه‌ها تولید شده مانند موارد برای ورق سرد رول شده می‌باشد- یعنی در آب نمک خواباندن، کاهش سرد آنیل و رول کردن تعدیلی کویل‌های داغ رول شده. فرآورده‌های دو بار کاهش

یافته پس از يك مقدار اضافي به اندازه 30 تا 40% آنیلینگ، به طورسرد رول می شوند (این مرحله بجای بازیابی انجام میگیرد). در حالیکه اکثر تناژ توليدي در نوردها قلع بصورت تك بار آنیل می شوند ، میزان قابل توجهي نیز به صورت مداوم آنیل می شوند (تأسیسات برای آنیل مداوم در حال حاضر در نوردهای قلع رایج ترند تا در نوردهای ورقه).

از آنجا که محصولات نورد قلع بطور سنتي در تأسیساتي تولید می شوند که از نورد های ورقه مجزا هستند ، کاربردهای این فرآورده ها نیز نسبت به ورقه سرد رول شده متفاوت هستند ، محصولات نورد قلع برای اختصاصات مجزا جهت ایجاد ویژگیهای مکانیکی بهبود یافته در طول آنیلینگ طراحی شده اند. فهرستی از این اختصاصات تعدیلی در جدول 6 ارائه شده است.

آنیلینگ کویلهاي باز درهر کوره ای تك بار، انجام می شود شامل بازیچي شل يك کویل سرد کاهش یافته است تا فضاي بازی را میان دوره های متوالي فراهم آورد . این به گازهای کنترل کننده اتمسفر امکان می دهد که بین دوره ها کشیده شوند ، حرارت دهی خنك سازی سریع تر و یکنواخت تري را نسبت به آنچه فراهم می کند که در مورد کویلهاي به شدت پیچانده شده

حاصل می‌شوند. بعلاوه با کنترل محتوای ئیدروژن و نقطه شبنمی اتمسفر شرایط کربن زدایی می‌توانند تثبیت شوند. کربن محتوی فولاد بدان وسیله می‌تواند تا سطح کم برای چنین موادی نظیر فولاد لعابی و فولاد الکتریکی کاهش یابد.

پیش‌شل کویل‌ها جهت آنیل کویل باز روی یک صفحه چرخان که دارای یک محور عمودی است صورت می‌پذیرد. همینکه کویل پیچانده می‌شود، یک فاصله‌گذار سیمی و پیچیده شده میان دورها وارد می‌شود. این فاصله‌گذار در طول آنیل در کویل باقی مانده و پس از آن که کویل از کوره برداشته شد (فاصله‌گذار) خارج می‌گردد. کویل سپس به طور محکم مجدداً پیچانده می‌شود و رول آماده بازیابی می‌شود.

جدول 5- ویژگی‌های خاص فولاد سرد رول شده با تیتانیوم تقویت شده

جدول 6- نامگذاری‌های سختی برای فرآورده‌های نور در قلع فولاد

آنیلینگ ساخته‌های فولادی

آنیلینگ مصنوعات غالباً انجام می‌شود تا برخی عملیات را تسهیل نماید، معمولاً فابلیت ماشین کاری کردن یا شکل‌دهی سرد. میزان آنیل لازمه توسط نوع و میزان ماشین‌کاری یا شکل‌دهی سرد که

قرار است انجام شود بعلاوة نوع ماده مربوطه مشخص ميگردد. براي برخي فرايندها ضروري است كه ريز ساختار كروي باشد در حاليكه براي ديگر کاربردها، ساختارهاي كروي ممكن است لازم يا حتي مطلوب نباشند.

آنيلينگ مصنوعات براي ايجاد قابليت ماشينكاري. در بسياري موارد، ساختاري مناسب براي ماشينكاري را ميتوان در مصنوعات فولاد كم كربن با انتقال دادن مصنوعات مستقيماً از عمليات ساخت به كوره اي كه تا دمائي استحاله به اندازه كافي گرم شده است، نگه داشتن در اين دما براي مدت زماني به حد كافي بلند جهت امكان تبديل آستينت و سپس خنكسازي در هوا توسعه مي يابند. در اين فرايندهاي دمائي مؤثر آستيني شدن دمائي پاياني ساخت است نه دمائي ابتدائي ساخت. اين پروسه قادر به توليد ساختارهاي بطور مناسب يكنواخت در مصنوعات است. با اين حال در مصنوعاتي كه بگونه اي شكل گرفته اند كه برخي بخشها به بقيه بخشها زودتر خنك مي شوند اين تفاوت در دمائي پاياني سبب خواهد شد كه ساختارها غيرمشابه باشند. اين فرايند عموماً ساختاري كروي را به استثناي فولادهاي پرآلياژي حاوي مقادير عظيم عناصر شكل دهنده كربيد ايجاد نمي كند، چنانچه يك ساختار لايه اي براي عمليات

بعدي مناسب باشد اين فرايند مي‌تواند با كاستن زمان پرداخت و تعامل، مصرف انرژي را به حداقل رسانده و هزينه‌ها را كمتر كند.

در بسياري موارد كه محصول يا فرايند بعدي

نيازمند سختي سازگار تري است، مصنوعات را

مي‌توان با گرم كردن تا دمائي بين 11 و 22 درجه سلسيوس (20 و 40 فارنهايت) زير Ae_1 ، و نگهداري به اندازه كافي (معين شده توسط درجه نرم سازي لازمه) و سپس خنك سازي در هوا (يا نظير آن) بصورت زير بحراني استحكام بخشي كرد. بايستي دقت كرد كه دما را زير Ae_1 حفظ كرد تا جلوي شكلگيري آستينت گرفته شود كه نيازمند آهنگ خنك سازي بسيار كم تري است.

در مصنوعات ايجاد شده از فولادهاي با كربن

بالتر با مقادير عناصر آلياژي يابدون مقادير

عناصر آلياژي، يك ساختار كروي عموماً براي

ايجاد قابليت ماشينكاري پر سرعت ترجيح هادني

است. انتقال مستقيم مصنوعات فولاد كربن به

كوره‌اي جهت انجا استحاله گاهي اوقات مي‌تواند

به عنوان گام مقدماتي يك چرخه آنيل و به عنوان

وسيله‌اي جهت جلوگيري از احتمال ترك خوردگي در

اجزاي فولادي عميقاً سخت شده بكار رود، اما به

ندرت به تنهائي ويژگيهاي رضايست بخشي توليد

خواهد كرد. اكثر آنيلينگ مصنوعات فولادي پر

كربن يا در يك كوره تكباري انجام مي‌شود يا در

يك كورة سيني متحرك مداوم ، زمان بندي هاي ويژه اي
براي كروي شدن فولاد 52100 در يك كورة تك
باري به قرار ذيل اند:

- آستينتي كردن با نگهداشت دست كم 2 ساعت
در 790 درجه سلسيوس (1450 فارنهايت) ، خنكسازي در
كوره تحت 17 سلسيوس در ساعت (30 فارنهايت در
ساعت) تا 595 درجه سانتیگراد (1100 فارنهايت)
سپس خنكسازي توسط هوا .

- آستينتي كردن با نگهداري در دست كم 2
ساعت در 790 سلسيوس (1450 فارنهايت) ، تا حد
ممکن خنكسازي تا 750 سلسيوس (1380 فارنهايت) ،
خنكسازي تحت 6 سلسيوس در ساعت (10 فارنهايت در
ساعت) ، تا 675 سلسيوس (1250 فارنهايت) سپس
خنكسازي توسط هوا .

- آستينتي كردن با نگهداري دست كم 2 ساعت
در 790 سلسيوس (1450 فارنهايت) ، تا حد
امكان پذير خنك سازي تا 690 سلسيوس (1275
فارنهايت) تبديل بصورت همدمما با نگهداري در
اين دمما به مدت 16 ساعت سپس خنكسازي توسط هوا .
در كلية موارد ، بار بايستي توزيع گردد تا
خنكسازي و گرمایش يكن واخت را ترويج كند .
استفاده از پروانه هاي چرخان در محفظه كوره به
طور گسترده اي به توليد محصولي كه در سختي و
ريز ساختار يکنواخت است كمك خواهد كرد .

يك كورة مداوم ويژه جهت آنيلينگ مصنوعات فولادي بايستي شامل 5 يا 6 ناحيه باشد . مثالي از عمل آوري آنيلينگ كروي سازي ويژه در چنين كوره اي در بخش بعدي ارائه شده است.

آنيلينگ مصنوعات براي قطعات سرد توليد شده و قطعات مجدد توليد شده :

چنانچه يك ماده خام فولادي نيازمند شكل گيري سرد بيشتر باشد، ممكن است لازم باشد كه آن را نرم تر ساخت تا ويژگيهاي خاصيت پلاستيك آن را تقويت كرد. در كل اين دسته از آنيلينگ فقط تا حدي انجام مي پذيرد كه عمليات شكل دهی ايجاب مي كند. يعني تأمين مقتضيات ابعادي ، مكانيكي، عمر ابزاري به همراه جلوگيري از ترك خوردگي وشكافته شدن. اكثر آنيلينگها تا حد متوسط بطور موفقيت آميزي انجام مي شود، اما فرايندهاي شكل دهی سرد بهتر از همه روي قطعاتي كه داراي ريز ساختار كاملاً كروي شده انجام مي شوند، بالاخص براي اجزاء ساخت شده از فولادهاي پر كربن. در يك كارخانه، فولادهاي 5160، 52100 هر دو به طور موفقيت آميزي توسط يك چرخه معمول در يك كورة سيني جابجاشونده 6 ناحيه اي، كرويت يافته اند . در اين چرخه، دماها در 6 ناحيه عبارتند از 750، 750، 705، 695، 695، 680 سلسيوس (1380، 1380، 1300، 1280، 1280 و 1260 فارنهايت)

زمان در هر ناحیه 150 دقیقه است. این فرایند مصنوعات فولاد 5160 را با سختی 170 تا 190HB و قطعات فولادی با سختی‌های 175 تا 195HB که هر دو مناسب عملیات ضربت سرد یا گرم هستند ایجاد می‌کند.

عموماً فولادهای با کربن کم را می‌توان به طور موفقیت‌آمیزی پس از گرم شدن تا دماهای نزدیک به A_1 و سپس خنک‌سازی تا 675 سلسیوس (1250 فارنهایت) تحت آهنگی کنترل شده بطور سرد شکل داد. در یک دستگاه فولاد 5120 آنیل شده به مدت 1 تا 2 ساعت هر 745 سلسیوس (1375 فارنهایت) آنیل شده و بطور آهسته خنک شد که به طور موفقیت‌آمیزی به صورت سرد شکل یافته است. مقادیر عظیم فولادهای 1008، 1513، 1524، 8620، 8720 پس از چرخه‌های آنیلینگ متشکل از 1 تا 6 ساعت در 720 سلسیوس (1325 فارنهایت) و به دنبال آن خنک‌سازی آهسته، بصورت سرد شکل یافته‌اند. شدت عملیات شکل‌دهی به همراه نوع فولاد و تاریخچه قطعه، مقادیر آنیل لازمه را تعیین می‌کند. کوره‌های تک‌باری، کوره‌های سینی متحرک مداوم و کوره‌های تسمه‌ای پیوسته بطور موفقیت‌آمیزی استفاده می‌شوند تا این اقسام از عملیات آنیلینگ در مورد فولادهای کم کربن را به انجام برسانند.

هر قطعه ای که حاوی تنش‌های چشمگیری است که از عملیات شکل‌دهی سرد یا عملیات ضربه زنی مجدد حاصل شده است را بایستی برای نوعی از فرایند آزاد شدن تنش بازبینی مجدد نمود. آزادسازی تنش معمولاً توسط چرخه‌های زمان-دما صورت می‌گیرد که منجر می‌شود به کاهش اندک سختی، این چرخه‌ها غالباً تشکیل شده اند از 1 ساعت در 425 تا 675 سلسیوس (800 تا 1250 فارنهایت).

استحکام بخشی برای کسب ریز ساختارهای پرلیتی مصنوعات - بالاخص ساخته‌های با فولاد پر کربن آلیاژی و معمولی - گاهی اوقات بصورت همدم آنیل می‌شوند تا ریز ساختار پرلیتی را ایجاد کنند که برای فرآیند بعدی ترجیح داده می‌شود. در فولادهایی که قرار است بطور القایی سخت شوند، مثلاً، توزیع کربید از ساختار پرلیت ریزدانه، شرایط عالی را برای کنترل بهینه در سخت‌شدگی آگاهانه ایجاد می‌کند. در حالیکه ساختار هسته‌ای به طور معقولي قابلیت ماشین‌کاری را ایجاد می‌کند.

آنیلینگ همدم جهت کسب پرلیت ریزدانه را می‌توان در کوره‌های تک‌باری یا مداوم انجام داد؛ با این وجود کنترل و یکنواختی دما، بحرانی‌ترند تا چرخه‌های آهسته خنک‌سازی و متداول چون معمولاً یک ریز ساختار خاص و یک سطح از سختی

خاص مد نظر مي باشد. در يك دستگاه يك كوره
تسمه اي پيوسته براي آنيلينگ همدماي مصنوعات
فولادي 1070 به كار مي رود. مصنوعات بطور
يكنواختي به مدت 30 دقيقه تحت 845 سلسيوس (1550
فارنهايت) 675C سلسيوس (1250 فارنهايت) خنك
شده و سپس به سرعت سرد شدند. ريز ساختار ايجاد
شده، ضرورتاً پرليت نرم لايه اي است با سختي 219
تا 228HB. سختي و ساختار را مي توان با تنظيم
دماي استحاله اصلاح كرد.

سختي پس از استحكाम بخشي
اشكال 6 و 5 اطلاعات را براساس سختي پس از
آنيلينگ ارائه مي كنند. اين اطلاعات براساس آنيل
مصنوعات ميله ها، لوله ها و حلقه هاي ساخته شده
از فولادهاي 1045، 4140، 4340، 8640H، 52100 مي
باشند. جزئيات هر چرخه آنيل به كار رفته هم
ارائه شده است.

استحكام بخشي ميله، لوله و سيم
تناژ چشمگير ميله، لوله و سيم در معرض
فرايندهاي گرمائي قرار مي گيرند كه سختي را
كاهش داده و ماده را جهت كار سرد و يا
ماشينكاري حاضر كنند. براي فولادهاي داراي كربن
كم (تا 0/2% كربن) آنيل زير بحراني کوتاه مدت

غالباً جهت آماده‌سازی ماده برای انجام کار س رد بیشتر کافیست. فولادهای دارای کربن و محتوای آلیاژی، کمتر نیازمند کروی شدند هستند تا حداکثر چکش‌خواری را حاصل کنند. اکثر محصولات کویل‌های فولاد آلیاژی و کربنی را می‌توان به طور موفقیت‌آمیزی با توجه به قواعد 2 و 3 کرویت بخشید («دستورالعمل‌های استحکام بخشی» را ملاحظه کنید). در آنیلینگ تک باری استفاده از دماهای بالاتر از حد معمول (نظیر 650 سلسیوس یا 1200 فارنهایت) در طول اولین گرمابخشی، سودمند است، چرا که دمای اولیه بیشتر، گرادیان دمای بالاتری در تغیر را در طول گرمایش متوالی در گستره دمای میان A_1 و A_3 ترویج می‌کند.

استفاده از یک دمای تصفیه بالاتر هم تجمع کاربیدها را در فولاد تشویق می‌کند و هم آنها را نسبت به انحلال در آستینت وقتی که دمای بار در نهایت بالاتر می‌رود مقاوم می‌سازد. وقتی استحاله تکمیل شود این کاربیدهای نامحلول برای شکل‌گیری یک ساختار کروی مناسب خواهند بود تا لایه‌ای.

شناختی از توزیع دما در کوره و دربار می‌تواند عاملی مهم در نیل به یک واکنش خوب و سازگار با کروی شدن باشد. توزیع دما و کنترل در کوره‌های تک باری و خلاء بحرانی‌تراند که ممکن است بارهایی تا 27 تن (30 تن) را نسبت به

کوره‌های پیوسته که در آنها بارهای معمولاً فقط 900 تا 1800 کیلوگرم (2000 تا 4000 پوند) ممکن است از محلی به محل دیگر جابجا شوند را بگیرند. در طول پیشرفت چرخه‌ها ترموکوپل‌های آزمایشی بایستی بطور خاصی در بالا، وسط و ته (درون و بیرون) بار نهاده شوند.

در کروی سازی جهت به حداقل رساندن شکل‌گیری پرلایت در هنگام خنک شدن، مهم است که مطمئن شد هیچ قسمتی از بار اجازه نمی‌یابد که به A_3 نزدیک شود. برعکس اگر دماها فقط اندکی بالا تر از A_1 به کار روند و نتوانند رل دما به خاطر جایگذاری ضعیف ترموکوپل‌ها دقیق نباشند، محتمل است که دمای A_1 حفظ نشود و اینکه آستینتی شدن رخ ندهد. جدول 7 ویژگی‌های مکانیکی خاص را نشان می‌دهد که می‌توانند در فولادهای ساده کربنی هیپوآوتکتوئید با کروی شدن طبق قواعد 2 و 3 حاصل شوند. دماهای توصیه شده و زمانها برای استحکام کروی و لایه ای فولادهای آلیاژ هیپوآوتکتوئید در جدول 4 ارائه شده‌اند.

کاربرد کارسرد قبلی درجه کروی شدن را افزایش داده و حتی چکش خواری بیشتری را نیز فراهم می‌کند. مثلاً فولاد 4037 در شرایط بصورت رول شده معمولاً می‌تواند تا یک مقاومت کششی حدود 515 مگاپاسکال (75 کیلو پوند بر اینچ) کروییت

پیدا کند. با این حال اگر ماده 20% کشیده شود و سپس کروی شود (که به آن عنوان «استحکام یافتن کروی در پروسه» اطلاق می شود) مقاومت کششی حاصله حول و حوش 470 مگاپاسکال (68 کیلو پوند بر اینچ) خواهد بود. هر چند کاربرد پیشین می تواند عملیاتی تقویتی نسبت به آنیلینگ باشد، بایستی در کروی شدن فولادهای ساده کربنی سرد کار شده با 0/2 درصد کربن یا کمتر احتیاط کرد. تا زمانی که در یک کاهش دست کم 20% اعمال نشده باشد، زبرشدگی شدید ذره ممکن است پس از کروی شدن مشاهده شود. این چنین دانه های زبر حاصل ترکیبی است مهم از کرنش و دمای آنیل منحصر به فرد فولاد و ممکن است به شدت عملکردهای بعدی را تضعیف نماید. در صنعت سیم، گستره ای وسیع از عملیات آنیلینگ «پروسه» برای رفع مسئله ماده کوئل شده برای ایجاد قابلیت فرایندهای بیشتری که ممکن است نیازمند شکل پذیری، قابلیت کشش، قابلیت ماشین کاری شدن یا ترک بی از این خصایص باشند مناسب باشد. یک نورد سیم بزرگ استفاده از 42 چرخه آنیلینگ مجزا و متمایز را گزارش می کند، که اکثر آنها ارائه گرحد وسط های ملاحظات عملی و ویژگی های بهینه هستند. مثلاً دماهای آنیلینگ زیر آنهایی که ممکن است نرمی بهینه را حاصل کنند گاهی بایستی برای کنار گذاشتن

مقیاسهای کویل‌های سیمی بکار روند که این اتفاق غالباً می‌تواند در کوره‌های با اتمسفر کنترل شده نیز رخ دهد.

حس اندکی تغییر مقیاس ممکن است سبب شود که پیچه‌های کویل به هم چسبیده که می‌تواند جلوی بازده کویل را در عملیات بعدی بگیرد.

شکل 5 نوسان در سختی Brinell برای فولادهای استحکام یافته کربن معمولی و کم آلیاژی توضیحات شکل 5- مصنوعات فولاد 1045 در 790 سلسیوس (1045 فارنهایت) در کوره خاموش از نوع تک‌باری، گرم شدند و در کوره تحت 11 سلسیوس در ساعت (20 فارنهایت در ساعت) تا 650 سلسیوس (1200 فارنهایت) خنک شده توسط هوا خنک شدند سختی حداکثر تعیین شده 207HB بود. سختی بر مبنای خط تولید صیقلی اندازه گیری شده است. اطلاعات مربوط به دوره چهار سال قبل می‌باشند. لوله‌های میله ای بدون درز در کوره متحرک مداوم آنیل شدند تا ساختاری غالباً لایه ای را ایجاد کنند. قطر میله‌ها از 47/6 تا 203 میلیمتر (1/875 تا 8 اینچ) نوسان داشت به ضخامت جدار لوله از 16 تا 35 میلیمتر (0/629 تا 0/379 اینچ) گسترده داشت. فولاد در کوره تحت آهنگ 11 سلسیوس در ساعت (20 فارنهایت در ساعت) تا

635 سلسیوس (1175 فارنهایت) خنكسازي شد و توسط هوا خنك گردید
 مصنوعات فولاد 4140 به يك كورة آنیل تكباري شده بصورت
 خودكارمنتقل شدند . مصنوعات 5 ساعت در 675 سلسیوس (1250
 فارنهایت) حفظ شدند. سختي در خط تولید صیقل یافته اندازه گیری
 شد. سختي معین شده گستر 170 تا 241HB را داشت.

مصنوعات فولاد 4340 جهت موتورهاي پیستونی هواپیما در يك
 كورة تكباري آنیل شده اند. مصنوعات 8 ساعت در 650 سلسیوس (1200
 فارنهایت) نگه داری شوند . سختي در خط تولید صیقل یافته
 اندازه گیری شد. سختي معین شده گسترده اي از 170 تا 241HB داشت.
 میله های فولادي داغ رول شده 8640H، با قطر 17/5 میلیمتر
 (11/15 اینچ)، کیفیت سرد پتك کاری، در پیچه های برای ایجاد
 حداقل سختي آنیل کروی یافته شدند.

لوله های بی درز فولاد 52100 در 790 سلسیوس (1450 فارنهایت) ،
 به سرعت در کوره تا 750 سلسیوس (1380 فارنهایت) خنك شدند، تحت
 6 سلسیوس در ساعت (10 فارنهایت در ساعت) تا 695 سلسیوس (1280
 فارنهایت) خنك شدند و توسط هوا خنك شدند.

برخي از عبارات به کار رفته در توصیف

فرایندهای آنیل در پروسه، در سراسر صنعت سیم
 کاربردی متداول دارند، در حالیکه باقی آنها در
 کارخانه ها یا نوردهای ویژه توسعه یافته اند .
 تلاشی برای اینکه همه نامها را که به
 عمل آوری های ویژه مربوط می شوند فهرست یا تعیین
 کرد انجام نمی شود.

Patenting شکلي ویژه از آنیلینگ است که خاص
 صنعت سیم و میله است. در این فرایند که معمولاً
 به رده های کربن متوسط و بالاتر از فولاد اعمال
 گردد، محصولات میله ای یا سیمی از حالت کوئل در

می‌آیند و صفحه‌ها تحویل پایانه آستینتی کردن می‌شوند. سپس صفحه‌ها به سرعت از بالای A_3 در محیطی مذاب – معمولاً سرب در حدود 540 سانتیگراد (1000 فارنهایت) – خنک می‌شوند تا مدت زمانی که کافی است تا به طور کامل تبدیل به یک ساختار خوب پرلیتی کند را تکمیل کند. حمام‌های نمک و بسترهای سیال شده هم برای این منظور به کار رفته‌اند. این فرایند بطور اساسی میزان کاهش کشش بعدی سیم را که محصول می‌تواند تحمل کند افزایش داده و تولید سیم با استحکام بالا را امکان‌پذیر می‌سازد.

کشیدن متوالی و patenting ممکن است به کار گرفته شوند تا اندازه و سطح مقاومت مطلوب را حاصل کند.

شکل 6- توزیع سختی برای حلقه‌های استحکام

یافته ساخته شده از یک فولاد اصلاح شده 25100

توضیحات شکل 6- حلقه‌ها به مدت سه ساعت تحت 790 سلسیوس (1450 فارنهایت) داغ شدند، به سرعت به 725 سلیوس (1340 فارنهایت) خنک شدند، تحت آهنگ 8 سلسیوس در ساعت (15 فارنهایت در ساعت) تا 695 سلسیوس (1280 فارنهایت) خنک شدند و توسط هوا خنک شدند. اندازه‌گیری‌های سختی از حلقه‌هایی بدست آمده‌اند که در موقعیتهای نهایی دربار کوره واقع شده بودند. فرایند منجر شد به ساختاری کروی شده. ترکیب: 0/9 تا 1/05 کربن، 0/95 تا 1/25 منگنز، 0/5 تا 0/7 سیلیم، 0/9 تا 1/15 کروم.

جدول 7- ویژگیهای خاص مکانیکی فولادهای کربن معمولی کرویت یافته

آستینتی کردن جهت سرد و گرم سازی را میتوان توسط کوره الکتریکی، روغنی یا گازی، در حمامهای دما بالای سرب یا نمک یا با القا یا گرمایش مقاومتی مستقیم انجام داد. به عنوان یک جایگزین برای سردسازی در سرب مذاب، خنک سازی پیوسته هوایی غالباً به کار میرود. چنین سرد و گرم سازی با هوا، کم هزینه تر است از «گرم و سرد کردن با سرب» اما منجر می شود به پرلیت زبرتر و غالباً فريت پرواوتکتوئیدتر ریز ساختاری که از دیدگاه کشش سیم با مقاومت کمتر مطلوب هستند.

آنیلینگ ورقه

محصولات ورقه ای گاهاً آنیلینگ جهت سهولت عملیات شکل دهی و ماشین کاری انجام میشود. .

آنیلینگ ورقه معمولاً در دماهای زیر بحرانی انجام شده و از دماهای آنیلینگ طولانی معمولاً اجتناب میشود. حفظ صاف بودن کافی می تواند مشکلی چشمگیر در آنیلینگ ورقه های عظیم باشد.

آنیلینگ محصولات لوله مانند

محصولات لوله مانند موسوم به «لوله مکانیکی» در گستره ای از کاربردها که می توانند شامل

ماشین‌کاری یا شکل‌دهی باشند به کار می‌روند .
 برای این محصولات که از رده های مختلف فولاد
 ساخته می‌شوند، آنیلینگ، فرایندی متداول است .
 در اکثر چرخه‌های آنیلینگ دماهای زیر بحرانی و
 زمان‌های کوتاه آنیلینگ جهت کاستن سختی تا سطح
 مطلوب به کار می‌روند. رده های پر کربن نظیر
 نوع 52100 برای اتصالات معمولاً کروی می‌شوند تا
 ماشین‌کاری را تسهیل کند. محصولات لوله‌ای تولید
 شده در نوردهای لوله به ندرت آنیل می‌شوند. این
 فرآورده‌ها بطور معمول رول شده و در شرایط
 نرمالیزه شده یا سرد شده و گرم شده بکار
 می‌روند.

واژه‌شناسی آنیلینگ:

آنیلینگ جعبه‌ای :

آنیلینگ يك فلز یا آلیاژ در محفظه های قفل
 شده تحت شرایطی که اکسیداسیون را به حداقل
 برساند . در آنیلینگ جعبه‌ای آلیاژهای فریتی،
 بار به آهستگی دمایی معمولاً ریز گستره انتقال
 اما گاهی در آن گستره یا بالای آن گرم می‌شود و
 سپس به آرامی خنک می‌شود. از این روند گاهی به

عنوان «آنیلینگ سربسته» یا «آنیلینگ قلمبه ایی» یاد می‌شود.

آنیلینگ براق :

آنیلینگ در محیطی حفاظتی تا جلوی تغییر رنگ سطح گرفته شود.

آنیلینگ نهایی :

یک فرایند آنیل زیر بحرانی اعمال شده به فولاد سرد کار شده با کربن کم یا متوسط، آنیل نهایی که یک فرایند حد وسط است تنش‌های پسماند را کاسته و بدان وسیله خطر زوال در ماشین کاری را در عین حفظ برخی مزایای قابلیت ماشین کاری شدن که توسط سردکاری ایجاد شده است را به حداقل می‌رساند.

آنیلینگ شعله‌ای :

استحکام بخشی که در آن گرما مستقیماً توسط یک شعله اعمال می‌شود.

آنیلینگ کامل :

گرم کردن تا یک دمای بالای دمای فوقانی بحرانی و حفظ در آن تا کسب آستینتی شدن کامل که متعاقباً همراه با خنک‌سازی کند یا تبدیل همدمما به زیر دمای بحرانی می‌باشد. ساختارها و

ویژگیهای خاص حاصل شده به ترکیب و ساختار اولیه فولاد و به سیکل دما - زمان خاص به کار گرفته شده بستگی دارند.

آنیلینگ بین بحرانی:

هر گونه فرایند آنیلینگ که شامل گرم کردن و نگهداشتن در دمایی میان دماهای بحرانی فوقانی و پایینی است تا آستینتی شدن ناقص حاصل شود و به دنبال آن خنک‌سازی کند یا نگهداری در دمایی زیر دمای بحرانی پایین‌تر.

آنیلینگ حد واسط :

آنیلینگ فلزات یا آلیاژهای ساخته شده در یک یا دو مرحله در طول تولید و پیش از فرایند نه‌ایی

آنیلینگ هم‌دما :

آستینتی ساختن کامل یا ناقص یک آلیاژ فریتی و بدنبالش خنک‌سازی و نگهداری در دمایی که در آن آستینت به یک توده نسبتاً نرم فریت - کربید تبدیل می‌شود.

پروسه آنیلینگ (یا در پروسه) :

هر گونه عملیات آنیل اعمال شده به هدف بازیابی چکش‌خواری جهت کاربرد بیشتر یا بعدی

وقتي بدون شرايط بيشتري به كار رود . اين واژه معمولاً به يك فرايند زير بحراني اطلاق مي شود. آنيلينگ بازيابي:

يك عمل آنيلينگ زير بحراني است كه آزادي تنش هاي پس ماند و قدرتي نرم شدگي يا احياي چكش خوارى در فولاد سردكار شده را فراهم مي كند . دماهاي به كار رفته زير آنهايي هستند كه شكل گيري ذرات جديد را از طريق تبلور مجدد ترويج دهند، و درجه نرم شدگي كه رخ مي دهد کمتر است از آنچه كه توسط آنيلينگ با تبلور مجدد حاصل مي شود.

آنيلينگ با تبلور مجدد:

آنيلينگ يك فلز يا آلياژ كار سرد شده جهت توليد ساختار ذره اي جديد بدون يك تغيير حالت

آنيلينگ كروي يافته (يا كروي سازي):

هر گونه عمل آنيلينگ طراحي شده بالاخص با توليد شكل كروي يا گويچه اي از كربيد در فولاد. آزادسازي تنش :

هر گونه فرايند آنيل كه به بكاهاش تنش هاي پس ماند منجرخواهد شد ، ولي فقط آن عمليات به منظور كاستن تنش هاي موجود در فولادهاي عمليات گرمائي شده يا سردكار شده انجام مي گيرد كه به

آن عملیات «تنش رهاساز» نیز می‌گویند. دماهای به کار رفته در اکثر عملیات آزادی تنش زیر آنهایی هستند که برای تبلور مجدد کامل لازم اند.

استحکام بخشی زیر بحرانی:
استحکام بخشی در دمایی زیر دمای پایین تر بحرانی. استحکام بخشی زیر بحرانی غالباً جهت احیای چکش‌خواری بین عملیات شکل‌گیری سرد یا کشش به کار می‌رود که در آن صورت غالباً به آن «استحکام بخشی پروسه‌ای» گویند.