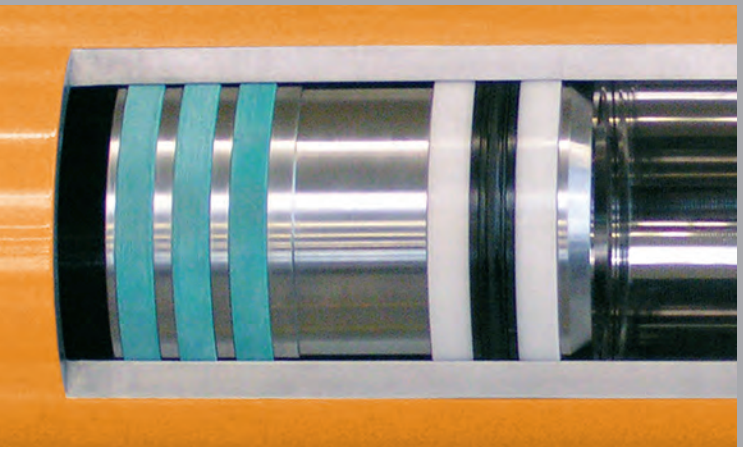


Sicherheitsoptimierte kaltzähe Präzisionsstahlrohre für Zylinderanwendungen

Safety-Optimized Low-Temperature Precision Steel Tubes for Cylinder Applications

SALZGITTER
MANNESMANN
PRECISION

A Member of the Salzgitter Group

Sicherheitsoptimierte kaltzähe Präzisionsstahlrohre für Zylinderanwendungen

Von Dr.-Ing. Michael Hagedorn, Dr.-Ing. Sven Herzig [1)]

Hydraulikzylinder kommen in nahezu jeder stationären und mobilen Maschine zum Einsatz. Sie haben die Aufgabe, definierte Bewegungen innerhalb der Maschine zu ermöglichen, häufig unter großer mechanischer Last. Daher sind die Anforderungen an Hydraulikzylinder stark unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten zu betrachten, insbesondere beim Einsatz der Maschinen in unmittelbarer Umgebung von Personen. Die Salzgitter Mannesmann Precision GmbH hat hierzu gemeinsam mit Kunden Auslegungsgrundlagen erarbeitet. Das Unternehmen ist Mitglied der Wirtschaftsvereinigung Stahlrohre e. V.

Mechanisch-technologische Grundlagen

Präzisrohre für Zylinderanwendungen werden mit einem vielfältigen Belastungskollektiv beaufschlagt. Dies sind beispielsweise durch Lastwechsel hervorgerufene axiale Druck- und Zugbeanspruchungen, durch ein Auskragen des Zylinders verursachte Biegebeanspruchungen und durch den Arbeitsdruck des Zylinders hervorgerufene Druckbelastungen im Inneren. Darüber hinaus sind insbesondere mobil einsetzbare Hydrauliksysteme wie Mobilkrane wechselnden klimatischen Verhältnissen ausgesetzt (Bild 2a). Dies kann kritisch werden, da die mechanischen Kennwerte wie Festigkeit und Zähigkeit temperaturabhängige Größen sind.

Bei der Beurteilung der Eignung eines Werkstoffes für die Anwendung als Hydraulikzylinder muss neben den üblichen mechanischen Kennwerten auch die Art des Versagens mit in Betracht gezogen werden. Aufgrund der Durckbeaufschlagung von innen kann ein berstender Hydraulikzylinder wie ein Sprengkörper wirken, wenn er sich mehrteilig zerlegt [1]. Für Personen in unmittelbarer Umgebung kann dies im schlimmsten Fall tödlich enden. Das bedeutet demnach, dass die Zähigkeit über das gesamte mögliche Einsatztemperaturspektrum des Werkstoffes von elementarer sicherheitstechnischer Bedeutung für die Auslegung von Hydraulikzylindern ist.

Im Hinblick auf axiale Lasten und Momente werden Hydraulikzylinder zumeist anhand der mechanischen Kennwerte Streckgrenze und Bruchdehnung ausgelegt. Die Zugfestigkeit spielt eine untergeordnete Rolle, da bei plastischer Verformung nach Überschreiten der Streckgrenze der Zylinder technisch versagt. Eine Erhöhung der Streckgrenze bietet erhebliches Potenzial für Gewichtseinsparung dadurch, dass bei gleichbleibender struktureller Festigkeit als Kombination von mechanischer Festigkeit und Material die Wanddicke in ähnlichem Maße reduziert werden kann, in dem die Festigkeit des Materials ansteigt. Dies erhöht die Nutzlast des Zylinders bei gleichzeitiger Erhöhung der Dynamik. Jedoch wird beim Einsatz von Stahl eine erhöhte Festigkeit üblicherweise auch durch eine reduzierte Zähigkeit erkauft. Darüber hinaus ist die Zähigkeit abhängig von der Prüf- bzw. Einsatztemperatur, da die Zähigkeit bei einer werkstoffcharakteristischen Übergangstemperatur rapide abnimmt.

Zur Beurteilung der Zähigkeit von Werkstoffen dient der Kennwert der Kerbschlagarbeit. Anhand dieser erfolgt entsprechend auch die Beurteilung darüber, ob der Werkstoff eines Hydraulikzylinders im Versagensfall duktil oder spröde und folglich mit einem hohen Sicherheitsrisiko für Leib und Leben im unmittelbaren Umfeld versagt [1]. Hierzu wird in der klassischen Literatur häufig die Kerbschlagarbeit in Längsrichtung (in neueren Versionen mit dem Hinweis auf Querrichtung) herangezogen [2]. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass aufgrund der Bauteilgestalt insbesondere bei Rohren, wie sie für Hydraulikzylinder eingesetzt werden, eine Ermittlung der Kerbschlagarbeit in tangentialer Richtung häufig nur mit großem Aufwand möglich ist.

Dieser Ansatz ist in mehrfacher Hinsicht problematisch. Zum einen ist der von der Literatur vorgeschlagene Wert von 27 J relativ gering und zum anderen gibt die Literatur diesen Wert lediglich in Längsrichtung vor. In verschiedenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Kerbschlagarbeit von 27 J in Längs- und Querrichtung nicht ausreicht, um mehrteiliges Bauteilversagen sicher auszuschließen. Ab einem Kerbschlagarbeitsniveau von mindestens 80 J[2)] bei Einsatztemperatur in Querrichtung kann jedoch ein mehrteiliges Bauteilversagen vermieden werden [3]. Bei der Betrachtung der Spannungsverhältnisse im Rohr anhand der Kesselformel wird deutlich, dass die Spannungen, die im Rohrquerschnitt vorliegen in tangentialer Richtung genau doppelt so groß sind wie in axialer Richtung („Bockwurst-Formel“) (Bild 1).

Das bedeutet, dass das Rohr im Versagensfall auf jeden Fall in Längsrichtung reißt und somit in diese Richtung eine definierte Zähigkeit vorliegen muss. Darüber hinaus ist der Rohrherstellungsprozess von einer resultierenden Anisotropie des Gefüges in ausgeprägter axialer Richtung geprägt, was zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften in axialer und tangentialer Richtung führt. Aus diesen Gründen ist es notwendig, die Zähigkeit des Werkstoffes in beiden Richtungen zu beschreiben und für einen sicherheitsorientierten Einsatz ausreichend hoch zu wählen [4].

Einsatzgebiete und klimatische Rahmenbedingungen

Mobilkrane und Baumaschinen werden in einem breiten Temperaturspektrum ein-

---

1) Dr. Michael Hagedorn, ist Produktentwickler und technischer Kundenberater für den Geschäftlichen Automobil, Dr. Sven Herzig ist Leiter der Abteilung Produktentwicklung und technische Kundenberatung für den Geschäftsbereich Industrie, beide bei der Salzgitter Mannesmann Precision GmbH (www.smp-tubes.com)

2) gilt nur bis Wanddicke von max. 19 mm.

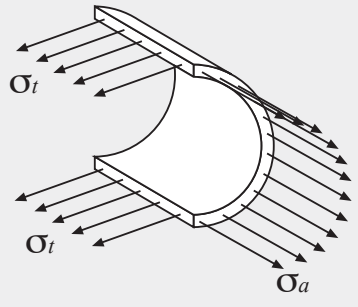
gesetzt und betrieben. Dem Hersteller ist selten der spätere Einsatzort des Arbeitsgeräts bekannt. So können unterschiedliche klimatische Bedingungen vorherrschen, z. B. in tropischen oder polaren Regionen (Bilder 2b und c)

Vor dem Hintergrund der Sicherheit muss gerade in kalten Klimazonen das Werkstoffverhalten der eingesetzten Hydraulikzylinderrohre beachtet werden. Im Temperaturbereich -20 °C bis +40 °C ändert sich das Zähigkeitsverhalten der Baustähle signifikant. Die Versagensart ändert sich von duktil zu spröde. In den vergangenen 10 Jahren hat die Kerbschlagarbeit im Bereich der Hydraulik durch ein gesteigertes Sicherheitsdenken zunehmend Beachtung gefunden. Berücksichtigt man zudem den Einsatzfall der Mobilkrane, wo große Lasten über weite Wege und teilweise bewohnte Gebiete transportiert werden, so wird die Bedeutung der Zähigkeit für die Sicherheit des Bauteils deutlich.

Werkstoffentwicklung für Hydraulikzylinder

Aufgrund der oben aufgeführten Rahmenbedingungen hat die Salzgitter Mannesmann Precision GmbH Werkstoffe wie den $P550_{MOD}$, $P650_{MOD}$ und $P700_{MOD}$ entwickelt, die genau diese technologischen, klimatischen und sicherheitsrelevanten Schwerpunkte berücksichtigen [3]. Diese kombinieren hohe Festigkeiten mit hoher Kerbschlagarbeit selbst bei niedrigen Einsatztemperaturen. Die mechanischen Kennwerte dieser Werkstoffe finden sich in Bild 3 dargestellt.

Durch systematische Weiterentwicklung ist es gelungen, sowohl die Festigkeit des Werkstoffes als auch seine Zähigkeit positiv zu beinflussen. Insbesondere die modifizierten Werkstoffe, hier repräsentiert durch den $P700_{MOD}$, bieten das Potenzial unter Berücksichtigung bestmöglicher Sicherheitsaspekte hochleistungsfähige Hydraulikzylinder herstellen zu können. Diese sind insbesondere dann für den Einsatz unter schwierigen klimatischen



$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot s}$$

$$\sigma_a = \frac{p \cdot D}{4 \cdot s}$$

P = Innendruck
S = Wanddicke
D = Mitteldurchmesser
σ_t = Tangentialspannung
σ_a = Axialspannung

Bild 1: Spannungen am mit Innendruck beaufschlagtem Rohr.

Verhältnissen geeignet. Vor allem beim Einsatz in mobilen Kranen oder anderen hydraulisch unterstützten Fahrzeugen kommt zusätzlich das Potenzial der Gewichtsreduzierung zum Tragen.

Werkstoffe für den Einsatz in Hydraulikzylindern

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Eigenschaften der Einsatzgüten zeigt sich, dass modifizierte Werkstoffe wie der $P550_{MOD}$, $P650_{MOD}$ und $P700_{MOD}$ neben Aspekten des Leichtbaus und der Nutzlasterhöhung einen erheblichen Gewinn an Bauteilsicherheit in sämtlichen Einsatzgebieten bieten. Der häufig in industriellen Anwendungen verwendete Werkstoff E355 ist unter den Gesichtspunkten Kaltzähigkeit und Eignung unter Innendruck als kritisch zu bewerten. Für den Übergangsbereich hinsichtlich der Kaltzähigkeit ist die SWB (Sonder Wärme Behandlung) entwickelt worden, der bei nicht innendruckbeaufschlagten Anwendungen in stationären Systemen zum einsatz kommen kann. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Einsatzgüten von Salzgitter Mannesmann Precision für Zylinderanwendungen.

Zusammenfassung

Hydraulikzylinder kommen in Mobilkranen bei unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen zum Einsatz. Häufig ist dem Hersteller der endgültige Einsatzort nicht bekannt oder durch Weiterverkäufe verwässert. Daher muss gewährleistet sein, dass die Zylinder zu keinem Zeitpunkt der Gefahr des mehrteiligen Zerlegens unterworfen sind. Untersuchungen bei der Salzgitter Mannesmann Precision GmbH in Zusammenarbeit mit Kunden haben in diesem Zusammenhang ergeben, dass eine Kerbschlagarbeit von 27 J in Längs- und Querrichtung nicht ausreicht,

Tabelle 1:

Eignung der Einsatzgüten*	Kaltzäh (-20 °C)	Für Innendruck	Leichtbaupotenzial	Für nicht innendruckbeaufschlagte Anwendungen
E355 +SR				
E355 (SWB)				X
$P550_{MOD}$	X	X		
$P650_{MOD}$	X	X	X	
$P700_{MOD}$	X	X	XX	

*) Einsatzgüten von Salzgitter Mannesmann Precision (SMP) für Hydraulikzylinder
x – geeignet, xx – sehr geeignet

Bild 2: Mobilkran bei der Montage eines Generatormoduls (a), im Wüsteneinsatz (b), und bei der Montage eines Windrades bei tiefen Temperaturen (c) (Fotos Liebherr).

um mehrteiliges Bauteilversagen sicher auszuschließen. Ab einem Kerbschlagarbeitsniveau von mindestens 80 J[2)] bei Einsatztemperatur in Querrichtung kann jedoch ein mehrteiliges Bauteilversagen vermieden werden. Dies sollte als Auslegungsgrundlage für die Herstellung von innendruckbeaufschlagten Zylinderrohren herangezogen werden.

Literatur

[1] Herzig, S.: Extrembelastung der Zylinderrohre macht Sonderstähle erforderlich. Maschinenmarkt 17/2007, S. 44-46

[2] DIN EN 10305-4: Präzisionsstahlrohre – nahtlose kaltgezogene Rohre für Hydraulik- und Pneumatik-Druckleitungen. Beuth-Verlag, Berlin 2003

[3] Brauer, H.: Herzig, S.: Klabbers-Heimann, J.; Fußmann, W.: Entwicklung und Optimierung von Stahlwerkstoffen für Hydraulikzylinder. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 39 (2008) 8, S. 551-556

[4] Herzig, S.: Beitrag zur Verbesserung der Tieftemperaturzähigkeit von Hydraulikzylinderrohren. Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Band 2, 2009

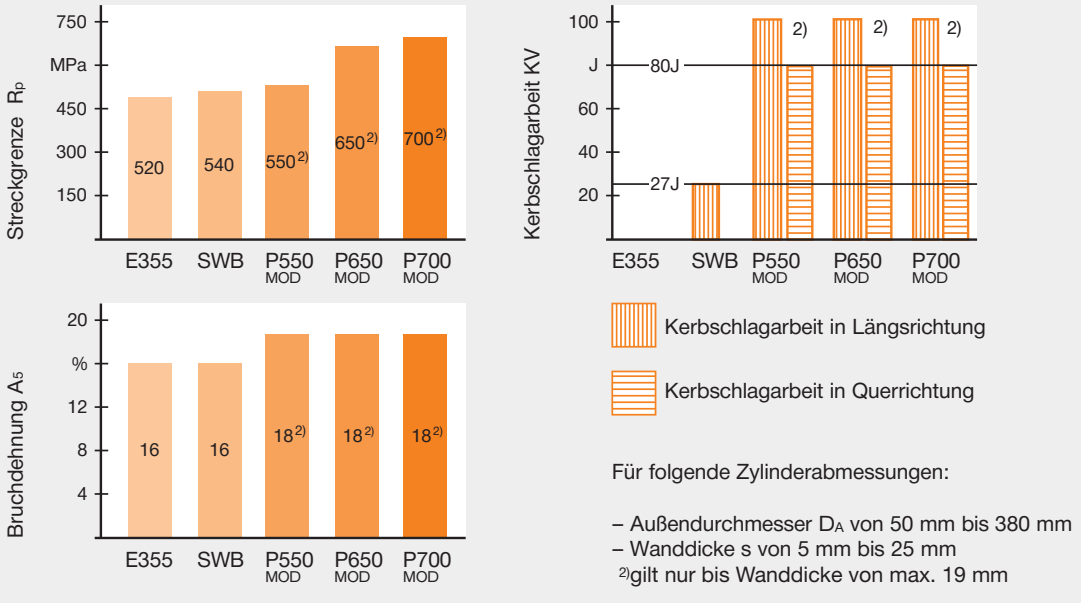


Bild 3: Mechanische und technologische Eigenschaften von Hydraulikzylinderwerkstoffgüten.

By Dr.-Ing. Michael Hagedorn, Dr.-Ing. Sven Herzig [1]

Hydraulic cylinders are used in almost all stationary and mobile machinery and equipment. They allow defined movements within the machine, often under substantial mechanical loads. Therefore particular attention needs to be given to safety-related aspects when considering the requirements for hydraulic cylinders - in particular when these machines are used in the direct vicinity of people. In this direction, Salzgitter Mannesmann Precision GmbH has worked out corresponding design principles in cooperation with its customers. The company is a member of the „Wirtschaftsvereinigung Stahlrohre e. V.“

Mechanical-technological fundamentals

Precision tubes for cylinder applications are subjected to a wide spectrum of loads, such as axial compression and tensile stresses caused by load alternations, bending stresses as a result of a protruding cylinder, and internal pressure loads due to the cylinder‘s operating pressure. Moreover, hydraulic systems for mobile applications such as mobile cranes are especially subject to changing climatic conditions (picture 2 a). This fact becomes critical as mechanical parameters such as strength and ductility are temperature-related values.

When assessing the suitability of a material for its application as a hydraulic cylinder, the type of a possible failure needs to be taken into account aside from the usual mechanical parameters. As a result of the pressurization from inside, a bursting hydraulic cylinder may act like a bomb disintegrating into several parts [1]. In the worst case, such an incident may cause fatal injuries to all people in the immediate vicinity. Hence, the material‘s ductility throughout the entire possible spectrum of application temperatures is of vital importance for the safety-related design of hydraulic cylinders.

With regard to axial loads and moments, hydraulic cylinders are most frequently designed on the basis of the mechanical parameters yield strength and elongation at fracture. The tensile strength plays only a subordinate role, as in the case of plastic deformation following exceeded yield strength values the cylinder fails technically. Increasing the yield strength offers a significant potential for weight saving. With an unchanged structural strength as a combination of mechanical strength and material, the wall thickness may be reduced to an equal extent. This allows a greater loading capacity of the cylinder with a simultaneous increase of dynamics. As a general rule, however, the price for a higher strength of the steel is a reduced ductility. In addition, ductility depends on the test and operating temperature, as ductility rapidly decreases at a material-characteristic transition temperature.

The ductility of materials is assessed on the basis of the notch impact energy. This parameter is also used to determine whether, in case of failure, the material of a hydraulic cylinder will exhibit ductile or brittle properties, and will thus represent a high safety risk for the direct surrounding area [1]. In this connection, classic literature often refers to the notch impact energy in longitudinal direction (in recent editions also with reference to the transverse direction) [2].

This is mainly due to the fact that as a result of the component‘s shape, in particular with tubes used for hydraulic cylinders, determining the notch impact energy in tangential direction often requires a high technical effort.

This approach is problematic in more ways than one. Firstly, the value of 27 J as suggested in the literature is relatively low, and secondly this value is only specified in longitudinal direction. Various examinations have proved that a notch impact energy of 27 J in longitudinal and transverse direction is not sufficient to definitely rule out a multiple failure of the component. From a notch impact energy level of min. 80 J[2] at operating temperature in transverse direction, this failure may be prevented [3].

Analyzing stress ratios in the tube on the basis of the boiler formula shows that stresses in the tube cross section are exactly twice as high in tangential direction as in axial direction (picture 1). Hence, in case of failure the tube will definitely split in longitudinal direction so that a defined ductility in that direction is required. Moreover, the tube production process is characterized by a resulting anisotropy of the structure in axial direction, which leads to different mechanical and technological properties in axial and tangential direction. The ductility of a material therefore needs to be described in both directions, with a sufficiently high value to be chosen for a safety-oriented application [4].

Fields of application and general climatic conditions

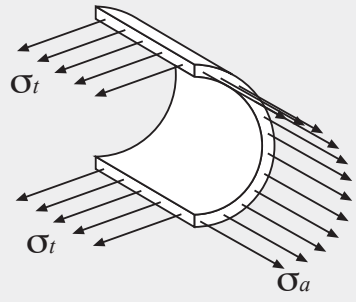
Mobile cranes and construction machinery are used and operated within a wide spectrum of temperatures. Rarely is the manufacturer aware of the later place of operation. Differing climatic conditions may play a role e.g. in tropical or polar regions (picture 2 b and c). In terms of safety-related aspects, the material behavior of the used hydraulic cylinder tubes needs to be considered above all in cold climate zones. In the temperature range -20°C to +40°C, the

---

[1] Dr. Michael Hagedorn is responsible for product development and technical customer consultation for the Automotive Division; Dr. Sven Herzig is head of product development and technical customer consultation for the Industrial Division, both with Salzgitter Mannesmann Precision GmbH (www.smp-tubes.com)

[2] only for a wall thickness of max. 19 mm

ductility of structural steels changes significantly, with the type of failure turning from ductile to brittle. As a result of an increased importance attached to safety considerations over the past 10 years, particular attention in the hydraulics sector has increasingly been given to the factor of notch impact energy. When also taking into account the application of mobile cranes, where big loads are transported over long distances and partly through inhabited areas, the significance of ductility with regard to the component safety becomes clear.



$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot s}$$

$$\sigma_a = \frac{p \cdot D}{4 \cdot s}$$

P = internal pressure
S = wall thickness
D = average diameter
σ_t = tangential stress
σ_a = axial stress

Picture: Stresses at a tube subjected to internal pressure.

Development of materials for hydraulic cylinders

In view of the basic conditions described above, Salzgitter Mannesmann Precision GmbH has developed materials such as $P550_{MOD}$, $P650_{MOD}$ and $P700_{MOD}$, which take into account exactly these technological, climatic and safety-related requirements [3]. They combine high strength with high notch impact energy even at l ow operating temperatures. Mechanical parameters of these materials are given in picture 3.

Through a systematic continued development, both the strength of the material and its ductility could be positively influenced. In particular modified materials – here represented by $P700_{MOD}$ – offer the potential of producing highly efficient hydraulic cylinders which are especially suitable for applications under critical climatic conditions by simultaneously observing optimum safety aspects. Above all when used in mobile cranes or other hydraulically assisted vehicles, the additional asset of weight saving comes into its own.

Materials for hydraulic cylinders

Against the background of the grades' properties as described above it is obvious that in addition to assets such as light-weight construction and increased loading capacity, modified materials such as $P550_{MOD}$, $P650_{MOD}$ and $P700_{MOD}$ offer a significant gain in component safety in all areas of application. Material E355 which is frequently used for industrial applications is to be viewed as critical in terms of toughness at sub-zero temperatures and suitability under internal pressure. For the transition region with regard to low-temperature properties, we have developed the SWB (SonderWärme Behandlung = Special Heat-Treatment), which can be used for applications in stationary systems without internal pressurization. Table 1 gives a survey of the properties and possible use of the various grades of Salzgitter Mannesmann Precision for cylinder applications.

Summary

Hydraulic cylinders are used in mobile cranes under the most varied climatic conditions. More often than not, the manufacturer is unaware of or has only insufficient knowledge of the actual region of application. It is therefore essential to make sure that at no point in time, cylinders are subject to the risk of multiple disintegration. Corresponding examinations and experiments conducted by Salzgitter Mannesmann Precision GmbH in cooperation with customers have demonstrated that a notch impact energy of 27 J in longitudinal and transverse direction is not sufficient to definitely exclude multiple component failure. However, from a level of notch impact energy of at least 80 J[2] at service temperature in transverse direction, a multiple component failure can be prevented. This should form the design basis for the manufacture of internally pressurized cylinder tubes.

Table 1:

Suitability of grades*

	for low-temp. service (- 20°C)	for internal pressure	light-weight potential	for applications without internal pressurization
E355 + SR				
E355 (SWB)				X
$P550_{MOD}$	X	X		
$P650_{MOD}$	X	X	X	
$P700_{MOD}$	X	X	XX	

*) internal grades of Salzgitter Mannesmann Precision (SMP) for hydraulic cylinders
x = suitable; xx = very suitable

[2] only for a wall thickness of max. 19 mm

Picture 2. Mobile crane assembling a generator module (a), in the desert (b), and during the assembly of a wind turbine at low temperatures (c).

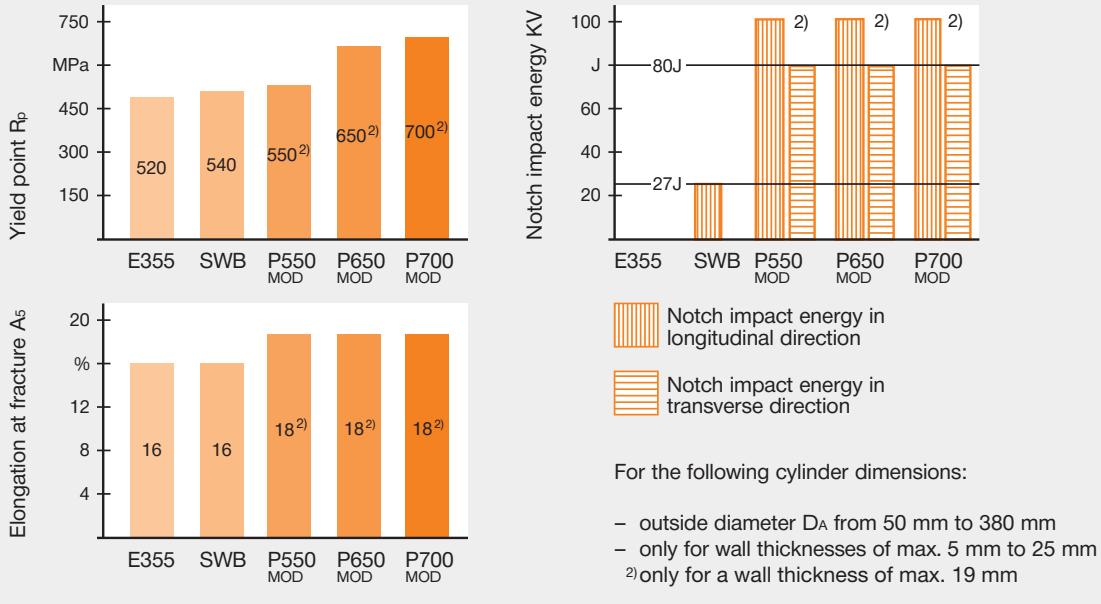
Literature

[1] Herzig, S.: Extrembelastung der Zylinderrohre macht Sonderstähle erforderlich. Maschinenmarkt 17/2007, S. 44-46

[2] DIN EN 10305-4: Präzisionsstahlrohre – nahtlose kaltgezogene Rohre für Hydraulik- und Pneumatik-Druckleitungen. Beuth-Verlag, Berlin 2003

[3] Brauer, H.: Herzig, S.: Klabbers-Heimann, J.; Fußmann, W.: Entwicklung und Optimierung von Stahlwerkstoffen für Hydraulikzylinder. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 39 (2008) 8, S. 551-556

[4] Herzig, S.: Beitrag zur Verbesserung der Tieftemperaturzähigkeit von Hydraulikzylinderrohren. Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Band 2, 2009



For the following cylinder dimensions:

– outside diameter D_A from 50 mm to 380 mm
– only for wall thicknesses of max. 5 mm to 25 mm
2) only for a wall thickness of max. 19 mm

Picture 3. Mechanical and technological properties of hydraulic cylinder material grades.

Salzgitter Mannesmann Precision GmbH
Wiesenstraße 36
45473 Mülheim/Ruhr, Germany

www.smp-tubes.com

Verkauf Handel und Industrie/
Sales Distributors and Industry

Salzgitter Mannesmann Precision GmbH
Wiesenstraße 36
45473 Mülheim/Ruhr
Germany

Tel.: +49 208 458-1507
Fax: +49 208 458-1635
handelundindustrie@smp-tubes.com

Salzgitter Mannesmann Etirage SAS
4BD des Iles
Immeuble Arc en Ciel – Bat A
F-92130 Issy Les Moulineaux

Phone: + 33 1 55 95 03 00
Fax: + 33 1 55 95 03 39
contact@smp-tubes.fr

Verkauf Automobilindustrie/
Sales Automotive

Salzgitter Mannesmann Precision GmbH
Wiesenstraße 36
45473 Mülheim/Ruhr
Germany

Tel.: +49 208 458-1203
Fax: +49 208 458-1251
automotive@smp-tubes.com

Salzgitter Mannesmann Etirage SAS
BP 38
F-89600 Saint Florentin

Phone: + 33 3 86 43 50 50
Fax: + 33 3 86 43 50 20
contact@smp-tubes.fr

SALZGITTER
MANNESMANN
PRECISION
A Member of the Salzgitter Group

Salzgitter Mannesmann Precision GmbH 01 D/E 1.11