

Stress of Bolted Joints

Jozef Dominik, PhD
www.ferodom.com
ferodom@ferodom.sk

“The bolted joint is no mindless monster, but a living organism with its own rich inner life. Only the one who knows and respects this life, can expect a reward in the form of reliability and safety”

1. Introduction

The bolted joints are exposed to various mechanical, chemical or most combined attacks when using (Table 1). Under certain adverse conditions it can cause crash structures often with tragic consequences. The submitted article tries to answer how and why it happens.

Table 1 Various operating forces

Kinds of operating forces	axial	centric tensile or pressure	static
		eccentric tensile or pressure	dynamic
	transversal	static	static
		dynamic	dynamic
	torsional	static	unilateral
		cyclically repeated torsional forces	bilateral

2. Stress analysis

2.1 Mechanical stress

As it can be seen from Fig. 1, the forces acting on the bolted joints have either static or dynamic character. Both cases can be in an uncontrolled effect dangerous for the construction.

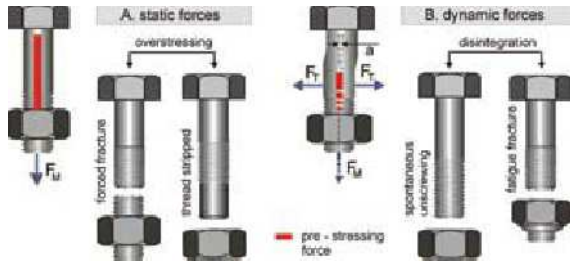


Fig. 1 Various mechanical forces / Çeşitli mekanik kuvvetler

A) Static forces

Significant difference in loading of bolted joints and other structural elements lie in the fact that, in case of bolted joints, the operating forces affect the pre-stressed system created by assembly (Fig. 2). By that, the final loading changes significantly.

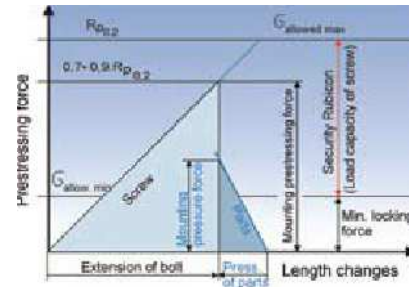


Fig. 2 Force triangle of bolted joint / Cıvatalı bağlantının güç üçgeni

The effect of operating forces does not allow to increase total pre-stress over permitted loading $\sigma_{allowed max}$, given by strength characteristics of steel. In other case the joint decay occurs, namely by brittle fracture of a screw or by thread run out (Fig. 3).

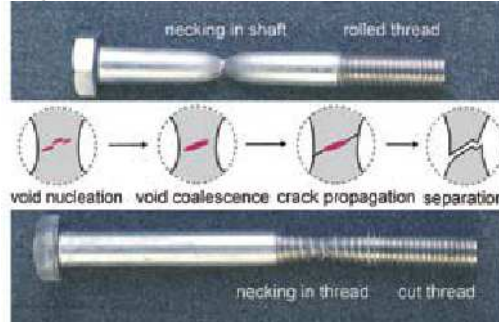


Fig. 3 Model for the static tensile stress / Statik çekme gerilimi modeli

Cıvatalı Bağlantıların Gerilimi

“Cıvatalı bağlantı, akılsız bir canavar değildir, fakat zengin iç hayatı ile yaşayan bir organizmadır. Sadece bu yaşamı bilen ve saygı duyan kişi emniyet ve güvenilirlik şeklindeki mükâfatı bekleyebilir”

1. Giriş

Cıvatalı bağlantılar kullanım sırasında, çeşitli mekanik, kimyasal veya birleşik saldırılara maruz kalırlar (Tablo 1). Belli olumsuz şartlar altında, trajik sonuçlarla parçalanmış yapılara sebep olabilirler. Bu yazı, bu durumun nasıl ve neden olduğunu açıklamaktadır.

Tablo 1 Çeşitli çalışma kuvvetleri

Çalışma kuvveti türleri	eksenel	merkezi gerilim veya basınç	statik
		dışmerkezli gerilim veya basınç	dinamik
	çapraz	statik	statik
		dinamik	dinamik
	burulumsal	statik	tek taraflı
		Dairesel olarak tekrarlanan burulumsal kuvvetler	çift taraflı

2. Gerilim analizi

2.1 Mekanik gerilim

Şekil 1'de de görüldüğü gibi, cıvatalı bağlantılar üzerinde hareket eden kuvvetler statik veya dinamik karaktere sahiptir. Her iki durumda da, yapı için tehlikeli olabilecek, kontrol edilemeyen bir etki olabilir.

A) Statik kuvvetler

Cıvatalı bağlantılar ve diğer yapı malzemelerinin yüklenmesindeki önemli farklılıklar, cıvatalı bağlantıların olduğu durumda, çalışma kuvvetlerinin montaj ile oluşturulan ön gerilimli sistemi etkilemesinde yatmaktadır (Şekil 2). Bununla birlikte, finaldeki yüklemeye önemli ölçüde değişmektedir.

Çalışma kuvvetleri etkisi, çeliğin güç özellikleri tarafından belirlenen yüklemeye üzerindeki toplam ön gerilimin artırılmasına izin verilen maks. müsaade etmemektedir. Diğer durumda, vidadaki kırılan çatlaklar veya

One-axis tensile loading is directed by common Hook's Law. After exceeding limits of proportionality, the damage of the material occurs in the shank area according to the model in Fig. 3 leading to the total destruction. Fig. 3 demonstrates various position of shank at once. The production technology of threads is the cause of it. Upper part of screw thread was strengthened by rolling therefore a shank was formed in the area of a weaker shaft.

Decay of bolted joint can occur also by thread run out (Fig. 4) or by excessive torsional loading (Fig. 5a) while assembly, respectively more often by disassembly. "Cold weld" is the typical cause of torsional fracture. It occurs by incorrect material combination, e.g. stainless steel A2/ steel (Fig. 5b).



Fig. 4 Run out thread of screw / Vida dişinin çürümesi



Fig. 5 Torsion fracture / burulum çatlağı

The results of simultaneous effect of torsional loading and tensile force are biaxial stress state, consisting of tensile part σ_M and sliding stress τ_M . The so called equivalent final stress σ_{ekv} results from these two stress components

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2}$$

which is then directly comparable to the limit of the steel slide. In accordance with VDI 2230 the limit of the slide should not be exceeded when tightening. However, the latest knowledge does not support this rule and recommends tightening to the slide limit, possibly higher; because of the external moment elimination (finishing assembly) and the influence of added tensile operating force, the stress part τ_M is reduced partially or even totally.

B) Dynamic forces

Material fatigue is directed by different fracture mechanism as a result of cyclical influence of external forces repeating.

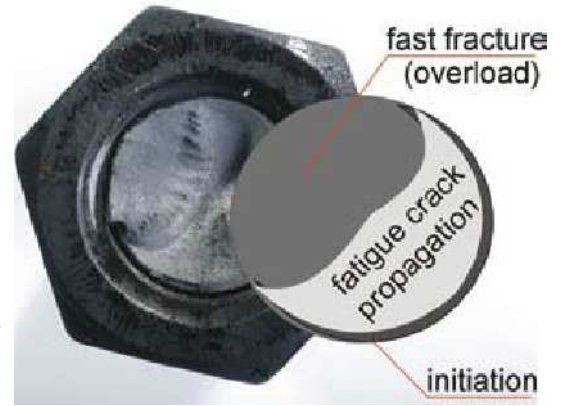


Fig. 6 Fatigue screw fracture / yorulan vida çatlağı

The fatigue crack is, in this case, initiated on the surface and spread in direction to the core to such an extent that it weakens cross-section which cause a sudden fracture of remaining screw part (Fig. 6). It is the most often occurring kind of mechanical bolted joints fracture. Fracture surface is localized into the places with the most concentrated stress. The input to nut is the most frequent place (Fig. 7) for the transition from smooth to thread part of screw.

sızıntı nedeniyle bağlantı çürümesi oluşur (Şekil 3)

Tek eksenli çekme yüklemesi, ortak Hook Yasası ile yönetilmektedir. Orantılılık limitleri aşıldığı zaman, cıvata sapı alanında şekil 3'teki modelde görüldüğü gibi toplu tahribe neden olabilecek malzeme hasarı oluşur. Şekil 3, çeşitli cıvata sapı pozisyonlarını göstermektedir. Bunun nedeni vida dişlerinin üretim teknolojisidir. Vida dişinin üst kısmı, silindirme ile güçlendirilmiştir; bu nedenle cıvata sapı, daha zayıf olan şaft alanında şekillendirilmiştir.

Vida dişi sızıntısı (şekil 4) veya aşırı burulumsal yükleme gibi (Şekil 5a) nedenlerle de montaj ve daha sıklıkla söküm sırasında cıvatalı bağlantılar bozulabilir. "Soğuk kaynak" burulumsal çatlağın tipik bir sebebidir; yanlış materyal kombinasyonu nedeniyle oluşur (örn; paslanmaz çelik A2/çelik) (Şekil 5b).

Burulumsal yükleme ve gerilme kuvvetinin eşzamanlı etkisinin sonucu gerilim parçası (σ_M) ve sürtünme kuvvetinden (τ_M) oluşan çift eksenli gerilme halidir. Bu iki gerilim bileşeninin sonucunda çelik kayma limiti ile kıyaslanabilir eşdeğer final gerilimi σ_{ekv} oluşur;

VDI 2230'a uygun olarak, kayma limiti sıkıştırma sırasında aşılmamalı-

dır. Fakat elimizdeki son bilgiler bu kuralı desteklememektedir ve kayma limitinin sıkıştırılmasını önermektedir; dış moment tasfiyesi (montajın bitimi) ve eklenen gerilim kuvveti nedeniyle, gerilim kısmı τ_M kısmen veya tamamen azalır:

B) Dinamik kuvvetler

Metal yorulması, tekrarlanan dış kuvvetlerin döngüsel etkisi sonucunda ki farklı çatlak mekanizmalar tarafından güdümlenmektedir.

Bu durumda yorgunluk çatlaması, yüzeyde başlar ve bu yönden merkeze doğru o kadar ilerler ki kalan vida parçasında aniden çatlak oluşturabilecek şekilde kesit alanını zayıflatır (Şekil 6). En yaygın şekilde oluşan mekanik cıvatalı bağlantı çatlaması budur. Çatlak yüzeyi, en yoğun şekilde gerilim ile lokalize edilir. Somun içi (Şekil 7), yumuşak alandan vidanın dişli kısmına geçiş için en sık kullanılan yerdir.

Tablo 1'e göre alternatif dinamik yükleme sadece bir yönden etkilemek zorunda değildir; şekil 8'de görüldüğü gibi iki taraflı da olabilir. Çatlak yüzeyinin ortasındaki çizgi, tipik bir örnektir. Kendiliğinden gevşeme, cıvatalı bağlantıların dinamik yüklemesinin bir yan etkisidir. Bu konu

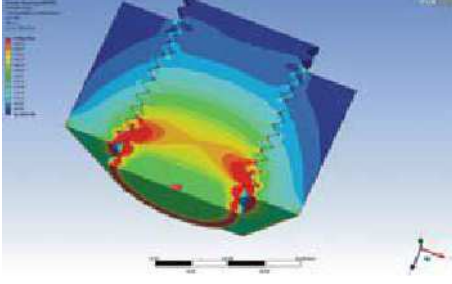


Fig. 7 The stress distribution gained with the help of FEM / FEM yardımıyla gerçekleştirilen gerilim dağılımı

According to Table 1, alternating dynamic loading does not have to affect only by one direction; it can be bilateral as it is shown in Fig. 8. "A ridge" in the middle of fracture surface is a typical example.



Fig. 8 Fracture surfaces after bilateral loading / çift taraflı yükleme sonrası çatlak yüzeyleri

Self-loosening is a side effect of dynamic loading of bolted joints. This topic deserves individual attention therefore it will not be elaborated here.

2.2 Combined mechanical-chemical loading

This term is understood as simultaneous corrosion attack of steel and mechanical influence. There are two such cases:

- Corrosion cracking
- Hydrogen embrittlement

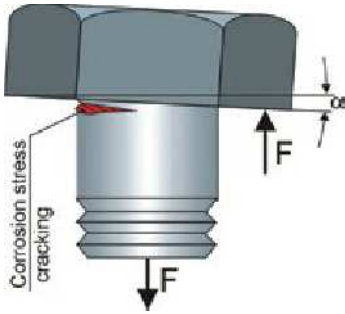


Fig. 9 Corrosion cracking / paslanma çatlakları

bireysel bir dikkat gerektirdiğinden burada işlenmeyecektir.

2.2 Birleştirilmiş mekanik-kimyasal yükleme

Bu terim, çeliğin paslanması ve mekanik etkinin eş zamanlı sonucu olarak anlaşılmaktadır. İki tane benzer durum vardır;

- Paslanma çatlakları
- Hidrojen gevremesi

Paslanma çatlama, saldırgan çevrenin, açıktaki kristal çelik örgüsünün içine ulaşmasına izin veren çatlakların (örn. vida başının altında/şekil 9) varlığı nedeniyle paslanmaz çeliklerde en sık şekilde oluşur.

Hidrojen gevremesi aldatıcı bir durumdur çünkü metalografik olarak ayırt edilebilir çok zordur. Şekil 9, hidrojen gevremesi örneğini pompa üzerinden göstermektedir. Hidrojen gevremesinin tasfiyesine neden olan pek çok farklı tavlama prosedürü bulunmasına rağmen, en iyi çözüm, tek-

Corrosion cracking emerges the most frequently in case of stainless steels and the cause of it is the existence of a crack, e.g. under the head of a screw (Fig. 9) which enables the access of aggressive environment into the uncovered crystal steel lattice. Hydrogen embrittlement is a treacherous thing because it is very hard to identify it metallographically. Fig. 10 demonstrates the example of hydrogen embrittlement in case of a pump.



Fig. 10 Hydrogen embrittlement of a pump joint bolt / pompa bağlantı civatasının hidrojen gevremesi

Despite of the fact that there are various annealing procedures leading to elimination of hydrogen embrittlement, the best remedy is to remove a contact with the sources of hydrogen from technological process. For example, galvanic processes (i.e. galvanization or staining of highly solid steels – Class 10.9 and 12.9) are very dangerous.

Conclusion

As it was mentioned in the text, bolted joints can fail in various ways. These failures are very dangerous. In order to prevent it or minimize the risks, it is important:

- To know perfectly the theory and practice of screwing, i.e. to master the behavior of bolted joints when assembly and in action.
- To know the conditions under which a future structure, respectively a product, will work.
- To respect prescribed assembly regulations.

Bolted joint then will reward you with reliable function and safety of operation.

nolojik işlemten hidrojen kaynakları temasını uzaklaştırmaktır. Örneğin, galvanik işlemler (örn. Yüksek katlılıktaki çeliklerin galvanizlenmesi veya boyanması-sınıf 10.9 ve 12.9) çok tehlikelidir.

Sonuç

Yazıda da bahsedildiği gibi, civatalı bağlantılar çeşitli şekillerde bozulabilirler. Bu bozukluklar çok tehlikelidir. Bunu önlemek veya riskleri en aza indirmek için;

- Vidalama teorisi ve pratiğini çok iyi şekilde bilmek (örn. montaj veya çalışma sırasında civatalı bağlantıların denetimi)
- Ürünün hangi koşullar altında çalıştığını bilmek
- Kurallarla saptanmış montaj düzenlemelerine saygı duymak çok önemlidir.

Bundan sonra civatalı bağlantı sizi güvenilir fonksiyon ve emniyetli çalışma ile ödüllendirecektir.