

1 Einleitung

Introduction

Das deutsche Klimaschutzgesetz sieht vor, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren [FEDE21]. Ein wesentlicher Ansatz zur Erreichung dieser Zielvorgabe ist die Leichtbauweise, mit der die Energie- und Ressourceneffizienz gesteigert werden soll [KLEI19]. Hierbei wird angestrebt, das Bauteilgewicht zu verringern, ohne die Funktionalität des Bauteils zu beeinträchtigen [MITT21]. Insbesondere bei zyklisch hoch belasteten Bauteilen führt eine Verringerung der Dimensionierung aufgrund der reduzierten Querschnitte bei gleicher Belastung zu erhöhten Lastspannungen. Diese erhöhten Lastspannungen sind vor allem in Bezug auf die Schwingfestigkeit kritisch zu bewerten. Besonders an Kerbstellen, wie Querbohrungen, konzentrieren sich die Lastspannungen, weshalb diesen Bereichen bei der Auslegung besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Zur Verbesserung der Schwingfestigkeit in diesen Bereichen kommen insbesondere lokale Härtingsverfahren, wie das induktive Härten, sowie mechanische Randzonenbearbeitungsverfahren, wie das Kugelstrahlen oder das Festwalzen, zum Einsatz. Diese Verfahren modifizieren gezielt die Randzoneneigenschaften. Hinsichtlich der Schwingfestigkeit sind hierbei vor allem die Härte, die Eigenspannungen und die Rauheit von Bedeutung. Bei Querbohrungen erweisen sich mechanische Randzonenbearbeitungsverfahren als besonders vorteilhaft, da das induktive Härten der gesamten Querbohrungsoberfläche mit herkömmlichen Induktoren nicht möglich ist. Lediglich die Wellenoberfläche kann gehärtet werden. Allerdings ist der Lastspannungsgradient in die Querbohrung hinein im Vergleich zu anderen Kerbstellen geringer, wodurch das Versagen bei induktiv gehärteten Wellen mit Querbohrung lediglich tiefer in die Querbohrung verlagert wird. Im Gegensatz dazu ermöglicht das Festwalzen eine Bearbeitung der gesamten Querbohrungsoberfläche und eine positive Modifikation der für die Schwingfestigkeit entscheidenden Randzoneneigenschaften Eigenspannungen, Härte und Rauheit.

Beim Festwalzen wird ein kraftbeaufschlagter Walzkörper über die zu bearbeitende Oberfläche geführt. Dadurch wird die Randzone inkrementell plastisch umgeformt. Die plastische Umformung führt zu einer Kaltverfestigung der Randzone, der Einbringung von Druckeigenspannungen und typischerweise einer Glättung der Rauheit. Der Einfluss dieser modifizierten Randzoneneigenschaften auf die Schwingfestigkeit hängt maßgeblich von der Stabilität der Eigenspannungen unter zyklischer Belastung im Betrieb ab. Bei geringer Eigenspannungsstabilität werden die eingebrachten Druckeigenspannungen im Betrieb nahezu vollständig umgelagert, was den positiven Effekt auf die Schwingfestigkeit mindert. Die Eigenspannungsstabilität ist dabei stark werkstoffabhängig, sodass das Festwalzen sowohl eine deutliche Verbesserung als auch keine signifikante Beeinflussung der Schwingfestigkeit bewirkt.

Der Einfluss des Festwalzens auf die Schwingfestigkeit wird derzeit überwiegend experimentell bestimmt. In Festigkeitsnachweisen, wie sie beispielsweise in der FKM-

Richtlinie vorgegeben sind, wird das Festwalzen innerhalb eines sogenannten Randschichtfaktors berücksichtigt. Der Anwender der Richtlinie wählt diesen Faktor innerhalb eines vorgegebenen Bereichs selbständig aus. Dabei sind Erfahrungen des Anwenders für eine zuverlässige Abschätzung entscheidend. Die Eigenspannungsstabilität wird in der Richtlinie jedoch nicht einbezogen. Dies führt dazu, dass bei der Anwendung der FKM-Richtlinie sowohl konservative als auch nicht konservative Abschätzungen der Schwingfestigkeit möglich sind [GÜNT24]. Eine stark konservative Abschätzung verschenkt Leichtbaupotenzial, während eine nicht konservative Abschätzung zu einem frühzeitigen Versagen des Bauteils im Betrieb führen kann. In Kapitel 5.5 der FKM-Richtlinie wird ein alternatives, vorläufiges Vorgehen zur Berücksichtigung von Randzonenbearbeitungsverfahren beschrieben. Hierbei wird unter anderem die Eigenspannungsstabilität mithilfe eines angepassten Haigh-Diagramms berücksichtigt. Dieses Vorgehen ist jedoch für Gusseisenwerkstoffe nicht anwendbar und führt auch bei Stahlwerkstoffen mitunter zu deutlichen Abweichungen von experimentellen Untersuchungen [GÜNT24]. Somit fehlen derzeit zuverlässige rechnerische Methoden zur Berücksichtigung des Einflusses des Festwalzens auf die Schwingfestigkeit, insbesondere bei Bauteilen aus Gusseisenwerkstoffen.

Ziel dieser Arbeit ist daher, die Zusammenhänge zwischen der Schwingfestigkeit von Bauteilen mit festgewalzten Querbohrungen unter Anwendung numerischer und empirischer Methoden zu verstehen. Darauf aufbauend soll eine Methode zur Vorhersage der Schwingfestigkeit für sowohl Gusseisen- als auch Stahlwerkstoffe abgeleitet werden. Hierzu werden zunächst die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Prozessparametern des Festwalzens und den resultierenden Randzoneneigenschaften durch experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen ermittelt. Auf dieser Grundlage wird der Einfluss der anschließenden schwingenden Belastung auf die Eigenspannungsstabilität numerisch abgebildet und bewertet. Anschließend wird experimentell der Einfluss der modifizierten Randzoneneigenschaften auf die Schwingfestigkeit und das Risswachstumsverhalten untersucht. Abschließend wird auf Grundlage des Kapitels 5.5 der FKM-Richtlinie, unter Berücksichtigung der numerischen Simulationen des Festwalzens und der Umlagerung der Eigenspannungen, ein angepasstes Verfahren zur Abschätzung der Schwingfestigkeit von Wellen mit festgewalzten Querbohrungen beschrieben und anhand der experimentellen Untersuchungen validiert.

Introduction

The German Climate Protection Act aims to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030 compared to 1990 [FEDE21]. A key approach to achieving this target is lightweight construction, which aims to increase energy and resource efficiency [KLEI19]. The aim here is to reduce the component weight without negatively impacting the functionality of the component [MITT21]. Particularly in the case of components subject to high cyclic loads, a reduction in dimensioning leads to increased load stresses due to the reduced cross-sections at equal loading. These increased load stresses are critical, especially with regard to fatigue strength. The load stresses are particularly concentrated at notches, such as cross bores, which is why special attention is devoted to these areas in the design phase.

Local hardening processes, such as induction hardening, and mechanical surface treatments, such as shot peening or deep rolling, are used in particular to improve the fatigue strength in these areas. These processes specifically modify the surface layer properties. In terms of fatigue strength, hardness, residual stresses and roughness are especially important. Mechanical surface treatments are particularly advantageous for cross bores, as induction hardening of the entire cross bore surface is not possible with conventional inductors. Only the shaft surface may be hardened. However, the load stress gradient into the cross bore is lower compared to other notches, which means that the failure of induction-hardened shafts with a cross bore is merely shifted deeper into the cross bore. In contrast, deep rolling allows the entire cross bore surface to be processed and positively modifies the surface layer properties of residual stresses, hardness and roughness, which are decisive for fatigue strength.

During deep rolling, a force-loaded rolling element is guided over the surface to be processed. This causes the surface area to be incrementally plastically formed. The plastic forming leads to work hardening of the surface area, the induction of residual compressive stresses and typically a smoothing of the roughness. The influence of these modified surface layer properties on the fatigue strength depends largely on the stability of the residual stresses under cyclic loading during operation. If the residual stress stability is low, the compressive residual stresses induced are almost completely redistributed during operation, which reduces the positive effect on the fatigue strength. The residual stress stability is strongly dependent on the material, so that deep rolling results in both a considerable improvement and no significant influence on the fatigue strength.

The influence of deep rolling on the fatigue strength is currently mainly determined experimentally. In strength verifications, such as those specified in the FKM guideline, deep rolling is taken into account within a so-called surface layer factor. The user of the guideline selects this factor independently within a specified range. The user's experience is decisive for a good estimate. However, residual stress stability is not included in the conventional directive. As a result, both conservative and non-conservative estimates of the fatigue strength are possible when applying the FKM guideline [GÜNT24]. A highly conservative estimate wastes lightweight construction potential,

while a non-conservative estimate can lead to premature failure of the component in operation. Chapter 5.5 of the FKM guideline describes an alternative, preliminary procedure for taking surface treatments into account. Among other things, the residual stress stability is taken into account with the aid of an adapted Haigh diagram. However, this procedure is not applicable for cast iron materials and sometimes leads to significant deviations from experimental investigations for steel materials [GÜNT24]. As a result, there is currently a lack of reliable analytical methods for taking into account the influence of deep rolling on fatigue strength, particularly for components made of cast iron materials.

The aim of this work is therefore to understand the relationships between the fatigue strength of components with deep rolled cross bores using numerical and empirical methods. Based on this, a method for predicting the fatigue strength for both cast iron and steel materials is to be derived. For this purpose, the cause-effect relationships between the process parameters of deep rolling and the resulting surface layer properties are first determined by experimental investigations and numerical simulations. On this basis, the influence of the subsequent oscillating loading on the residual stress stability is numerically modeled and evaluated. Afterwards, the influence of the modified surface layer properties on the fatigue strength and crack growth behavior are investigated experimentally. Finally, on the basis of chapter 5.5 of the FKM guideline, an adapted procedure for estimating the fatigue strength of shafts with deep rolled cross bores is described, taking into account the numerical simulations of the deep rolling and the redistribution of the residual stresses, and validated on the basis of the fatigue strength tests.