

# 鋼結構的裝配与焊接程序 及防止變形的方法

Д. И. 納夫羅茨基 著

建築工程出版社

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 序 言 .....              | 2  |
| (一) 焊接的变形与应力 .....     | 3  |
| 1. 引起变形与应力的原因 .....    | 3  |
| 2. 变形与应力的种类 .....      | 9  |
| 3. 影响变形与应力大小的因素 .....  | 11 |
| 4. 变形与应力的作用 .....      | 15 |
| (二) 减少焊接变形与应力的方法 ..... | 20 |
| 1. 装配与焊接程序的选择 .....    | 20 |
| 2. 焊接时的固定 .....        | 24 |
| 3. 反向弯曲 .....          | 27 |
| 4. 焊缝的施焊程序 .....       | 31 |
| 5. 安装接头的焊接程序 .....     | 33 |
| 6. 焊接应力的去除 .....       | 35 |
| 7. 焊接后的矯正 .....        | 37 |
| 参考书籍 .....             | 39 |

## 序 言

制造焊接結構时，結構中有发生变形与內应力的危险。这种变形和应力可能导致結構尺寸和形状的改变，有时甚至会出现裂縫。

因此，焊接时必须采取措施，以防止上述现象的发生，或者把这些现象限制在一定的界限以内，使得結構尺寸和形状改变的影响将不会有什么危险。

为了正确地拟訂焊接結構的制造工艺，就必须要了解焊接变形与应力的发生及发展过程。

焊接时所产生的变形和应力，以及焊接結構制造过程中对此加以考虑的必要性，是金属焊条电弧焊接的发明者Н.Г.斯拉文諾夫(Славянов)首先提出的。他当时就指出：焊接应力是由于焊接时焊件加热不均匀而产生的，加热不均匀也会引起局部塑性变形。Н.Г.斯拉文諾夫当时就找到了一些防止由应力所产生的不良影响的方法，这些方法（如焊件的預热，焊縫的热鍛）现在还被采用着，他还在那时就指出了脆性与塑性金属中出现焊接应力的差别，以及焊接刚性固定的焊件时所产生的应力的特殊危险性。

必須指出：在結構制造过程中，由于加工所引起的变形与应力并不是焊接結構所独有的特性。大家知道，几乎随便采用那种金属加工方法都会出现变形与应力。例如，浇鑄、压延、冲压、冷作、輓弯、切削加工、热处理及其他金属加工方法都不例外。

由于苏联的学者們和生产革新者們解决了一系列的科学問題，其中包括掌握焊接变形与应力的問題，因而制定复杂焊接結構的现代化制造方法就有了可能。

## (一) 焊接的变形与应力

### 1. 引起变形与应力的原因

焊接时,焊件的加热是不均匀的,这样就引起了温度变形的不均匀分布,当焊件被加热的各部分間具有总的联系时,焊件中就会产生内应力。

焊件中产生内应力的过程可以简单地用下列说明:

两块钢板对头焊接时(图1),只有焊件中部直接靠近焊缝的地方高度受热,离开焊缝较远的区段受热是不高的,因此为了简便起见,可以不加考虑。

焊缝区域内受热区段的伸长,不仅取决于温度的作用,而且也与相邻未受热区段的某些反作用有关,因为受热区段是与整个焊件連在一起的。因此,它的变形不可能与焊件的其他部分无关。

为了阐明上述每一原因(温度及相邻区段的阻力)对焊件变形的影响,可以先研究几个假定的情况,我們假设受热区段与焊件的其他部分沒有連系(在图1a中,这一部分已用带点虚线标出),这个受热区段的伸长只取决于温度,且等于:

$$\lambda = \alpha T,$$

式中:  $\lambda$ ——相对伸长;  
 $\alpha$ ——线膨胀系数;  
 $T$ ——加热温度。

为了简便起见,假设图1中焊件的长度为1,这时的相对变形同时也就是绝对变形,在这种情况下,温度伸长不受其他原因限制,且在膨胀的区段中不产生任何内应力,冷却时,中间部分的缩短也是自由的,这时将不会有任何剩余变形和应力。

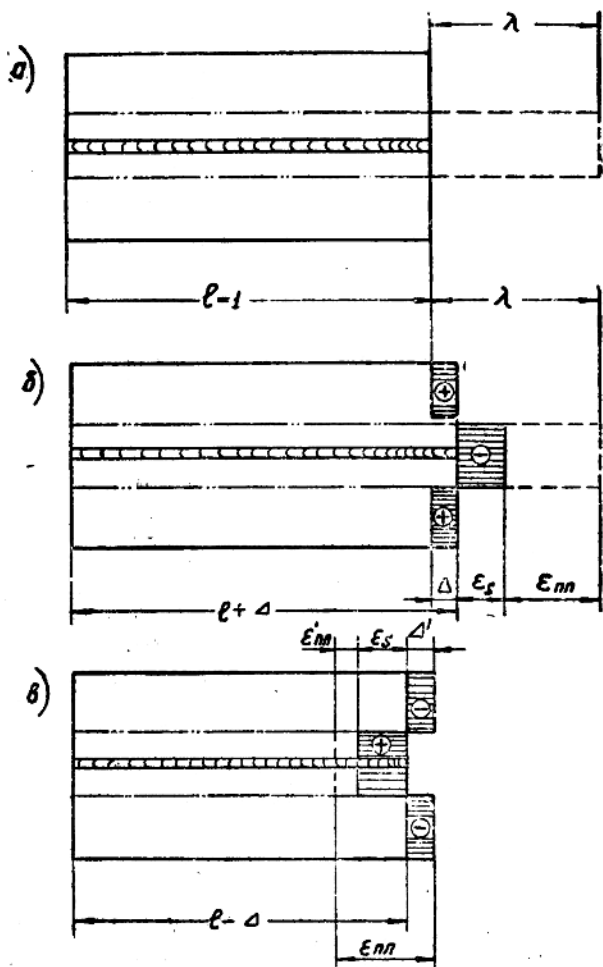


图1 对头焊接时的纵向变形与应力的示意图

$a$ —焊接钢板;  $b$ —加热时的变形(暂时的);  $c$ —冷却后的变形(剩余的)

否則当各区段間有連系时,将会产生不同的过程。在这种情况下,中間部分的变形不可能是独立的,且在加热时,边上未受热区段也会产生某些伸长,未受热区段对伸长的阻抗妨碍了受热部分的温度伸长,結果就产生了整个焊件的某些总伸长—— $\Delta$ (图16),其值由阻 抗力的平衡条件确定,即由內 应力和各区段的尺寸确定,这时未受热区段的应力将为拉力,其值为:

$$\sigma_2 = E \Delta,$$

式中:  $E$ —材料的弹性模量(公斤/平方公分)。

受热区段內产生压应力,其值由热伸长 $\lambda$ (即当沒有相邻区段反作用时所产生的伸长)与焊件实际伸长 $\Delta$ 之差确定(图16)。

未受热区段的阻抗会引起受热区段的压缩,并且使受热区段的变形减小。

这样,由于焊件局部加热的結果,焊件中就要产生內应力: 受热区段的压缩及邻近区段的拉伸。

实际上,焊接时变形与应力的形成过程由于加热时金属性能的改变而变得复杂化了。

图2a表示焊接結構中最常遇到的材料——低炭鋼的拉伸图,图26表示流限与温度的关系。

由于焊接时,焊縫区內受热很高,温度变形 $\lambda$ 与实际变形 $\Delta$ 之間有差别,一般应力将高于流限:

$$\lambda - \Delta > \epsilon_s.$$

这样在焊縫区域內不仅产生弹性变形 $\epsilon_s$ ,而且也产生塑性变形 $\epsilon_{пл}$ 。

$$\lambda - \Delta = \epsilon_s + \epsilon_{пл}.$$

温度变形与实际变形之差( $\lambda - \Delta$ )不会大于1~1.5%,因此对于具有足够流幅的材料(即多数焊接結構所采用的材料)焊縫区域內的应力不会高于流限:

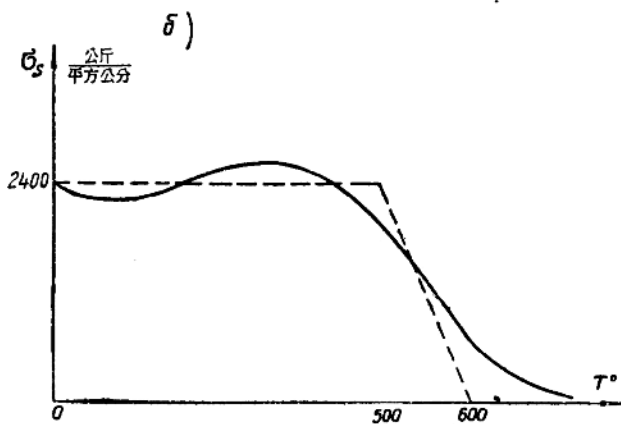
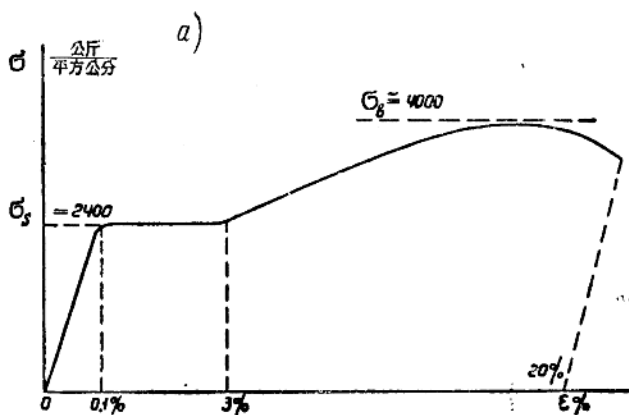
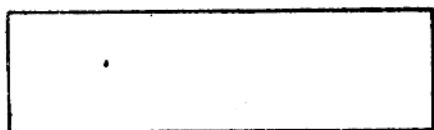
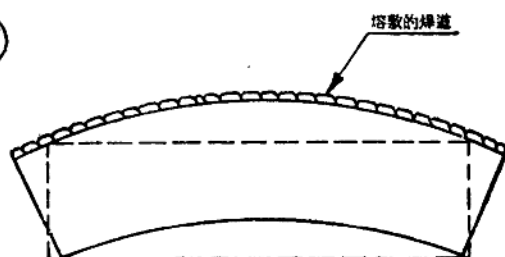


图 2 低碳鋼的机械性能  
a—拉伸圖；b—加熱時流限的變化

a)



b)



б)

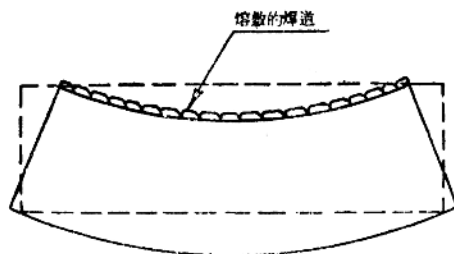


图 3 加热不对称时的变形示意图  
a—加热前; б—加热的结果; в—冷却后

$$\sigma_1 = E \cdot \epsilon,$$

塑性变形不会反回,因此甚至当焊件完全冷却以后,这种变形仍残存着。

假如在加热过程中不产生塑性变形(这种情况在预热焊接时是可能的),那么就不会出现剩余变形与应力。

由于在焊缝区域内产生局部塑性压缩变形的结果,而引起的剩余变形与应力的分布情况(图16)和加热时所产生的变形与应力的分布情况(图16)相似,而符号则相反。冷却时,应力图的画法与加热时应力图的画法相似,所不同的只是在这种情况下,应当考虑到的是焊接过程中产生的塑性变形 $\epsilon_{\text{пл}}$ ,而不是温度变形。

剩余应力的分布(图16)与加热时暂时应力的分布(图16)相似,但其符号相反。在焊缝区域内剩余应力为拉应力,而在远离焊缝的区域內则为压应力。

由于焊接而产生的总剩余变形 $\Delta^1$ 是收缩变形。

当焊缝对称分布时,其纵向缩短不会引起弯曲。但在不对称加热的情况下,除收缩变形外也可能出现弯曲变形,例如:在钢板边上焊焊道或气割时就可能发生这种情况。

更全面的考虑到各种现象可以知道,就是焊缝布置得对称,焊件的边也会产生弯曲变形。这是因为沿焊件全长并不能同时进行焊接,而且沿边长温度的分布也不均匀。为了更好的说明横向(对焊缝方向来说)应力,我们来研究对头焊接板的各部分的变形。如用机械方法把钢板沿焊缝切开,就可以得到这种变形(图4a)。切开后板的各部分向外凸出弯曲(图4b)。假如认为,对头焊缝阻碍了这种弯曲,并且保证两部分紧密接触的话,则可设想到,应力分布将如图所示(图4c),图形表明:沿焊缝长度横向应力的符号是改变着的,焊缝的中间部分作用着拉应力,而沿焊缝的端部则作用着压应力(图4)。

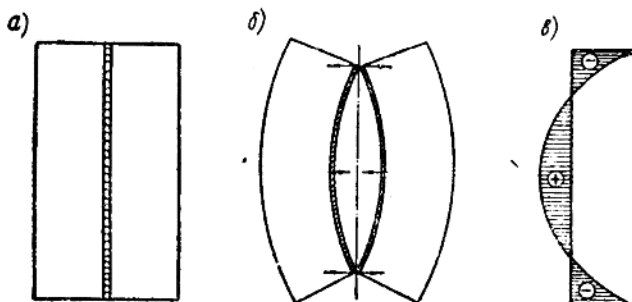


图 4 横向变形与应力示意图

a—焊好的钢板；b—沿焊缝切開時的變形；c—橫向應力

当温度不仅沿着钢板的长度与宽度，而且也沿其厚度不均匀分布时(图5)，将会发生钢板平面外的变形，这种变形称为角变形，角变形不仅在对头焊接时产生(图5a)，就是以角缝焊接丁形断面时，也会产生角变形(图5b)。

## 2. 变形与应力的种类

焊接时在焊缝区域内产生的塑性变形会引起焊件的总变形，这种变形可能是非常复杂的。总变形可以分为某些独立的分变形：

a) 被焊钢板平面内的变形——属于这种变形的有纵向变形、横向变形及弯曲(图1、3、4)；

b) 被焊钢板平面外的变形——图5所示即属于这种变形。

在焊接过程中及焊接终止后焊缝完全冷却时，结构中都可能存在焊接变形与应力，前者称为暂时的，后者则称为剩余的。

剩余变形和应力有着很大的实践意义，结构在使用时，这种变形与应力可能影响到结构的工作。

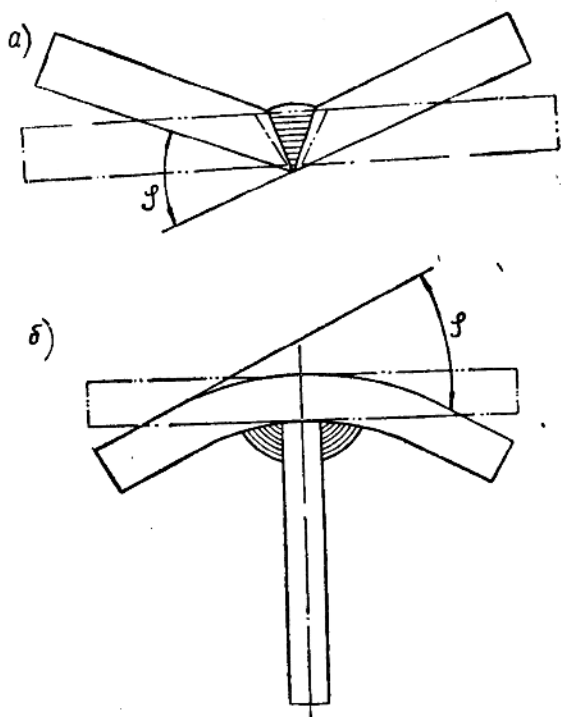


图 5 角变形示意图

$\alpha$ —在平板中； $\delta$ —在丁形断面中

在研究焊接结构应力状态时，应力沿断面分布的特点有很大的意义。断面内有平衡的①与不平衡的内应力系统时，焊接应力是不同的。

不平衡的内应力系统与各被焊构件的固定程度有关，它主要地发生在焊接安装接头时。

① 即在断面内合力为0——译者

焊接固定好的焊件时所产生的内应力与固定的反作用相平衡，故称为作用应力。

在用鋼方面，必須把焊接低炭鋼結構与焊接合金鋼結構的两种情况区别开来。在后一情况下，由于金属晶体結構上的改变，除了在宏观体积中出现应力以外，也会在微观体积中出现应力。焊接合金鋼結構时发生的应力，就其出现的性質來說比起焊接低炭鋼时发生的应力有着更特殊的意义。

焊接合金鋼的結構时，需用专门方法使焊缝区域内保持所需要的金属晶体結構，如采用預热法或在焊完后进行热处理。热处理除可以改变金属的晶体結構外，同时也可以降低内应力。在这种情况下，制造好的結構中就不会有剩余应力。

### 3. 影响变形与应力大小的因素

根据对焊接变形与应力形成原因的分析，我們知道：焊接变形与应力的 size 取决于温度分布的特性和焊件的尺寸。

焊接时，焊件中温度的分布取决于焊接电弧热量傳入焊件的强度，而焊接电弧的热量則依焊接规范而定。

焊接时，焊件加热强度用单位长度的热量值来表示：

$$q_n = \frac{q}{v} = \frac{\eta \cdot 0.24 J \cdot U}{v},$$

式中：  $q_n$ ——单位长度的热量(卡/公分)；

$q$ ——电弧热功率(卡/秒)；

$v$ ——焊接速度(公分/秒)；

$U$ ——电弧电压(伏)；

$J$ ——焊接电流强度(安)；

$\eta$ ——焊接电弧热效率(根据不同的焊接条件，可在 0.5 ~ 0.7 的范围内选用)。

在焊接变形与应力的理論中指出, 焊接变形与焊接规范之間的联系, 总的說来是一种相当复杂的关系。

从图 6 所示不同宽度扁鋼的变形与单位长度热量关系的例子中可以看出, 焊接规范对构件变形的影响不是单一的。开始时, 单位长度热量增加, 变形也随之增加。增加到某一极限以后, 单位长度热量的繼續增长将会使变形减小。对于不同剛度的构件, 达到这种极限状态的条件也是不同的。因此, 单位长度热量的改变可能对各种扁鋼的变形产生不同的影响。

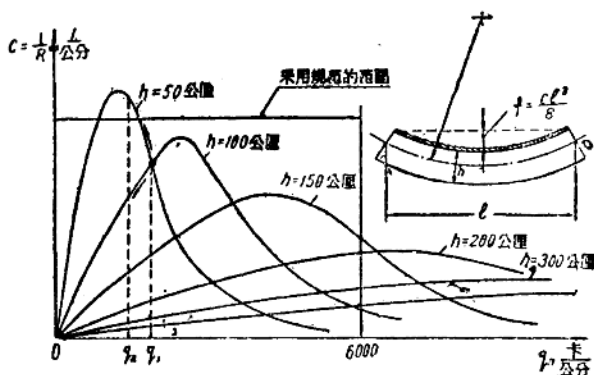


图 6 扁鋼变形与焊接规范及尺寸的关系

例如, 有高  $h=50$  公厘和  $h=100$  公厘的两种扁鋼, 采用由单位长度热量  $q_1$  所确定的某一焊接规范时, 这两种扁鋼的变形情况相同, 而当单位长度热量减少至  $q_2$  时, 則窄扁鋼的变形增加, 相反, 較宽的扁鋼的变形則会减少。

极限状态的存在是由于在某一单位长度热量之下, 輸入焊件的热量强度高于傳至焊件其他未受热区域的热量强度之故。热量强度的繼續增加使整个焊件加热更均匀, 因此变形就减小了。

但是对于最常遇到的焊接条件——焊件的刚性较大(如宽为  $b \geq 200$  公厘的扁钢)——只有在很大的单位长度热量 ( $q_n = 6000$  卡/公分)时,才会达到极限状态,而这种单位长度热量实际上是达不到的。因此焊接变形与焊接规范之间的关系就大大地简化了,且可以用直线关系来表示。

除了焊接规范与焊件尺寸以外,变形与应力也取决于一些其他的焊接条件。

利用图 6 所示的关系,对于变形的其他影响(如低温焊接或者相反地——预热焊接)也可做出良好的估价。

一般说来,在严寒下焊接的特点是单位长度热量会降低(因为热损失大),这样对于刚性足够大的构件(对于扁钢,当  $b \geq 200$  公厘时)将会使变形减小。实践中的大部分情况也证明了这一点。

气焊时,加热规范的特点是焊件加热区域比弧焊来得宽,且焊接速度相对地也比较低,因此,气焊时焊件的变形更加显著。

根据焊接变形与应力理论[1]、[2]、[3]、[4]中所叙述的计算方法,可以确定变形大小、焊接规范、焊件尺寸、焊缝的位置与尺寸之间的数量关系。

由于焊接纵向缝而引起的变形,其特征是构件轴线的弯曲和纵向收缩。构件的弯曲常由其曲率决定,曲率就是弯曲轴线半径的倒数(图 7)。

由于焊接纵向缝所引起的型钢构件沿其全长的曲率为:

$$C = 3.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{q_n \cdot Z}{J},$$

式中:  $C$ ——构件曲率(1/公分);

$q_n$ ——单位长度热量(卡/公分);

$Z$ ——自纵向缝到断面重心的距离(公分);

$J$ ——构件横断面的惯性矩(公分<sup>4</sup>)。

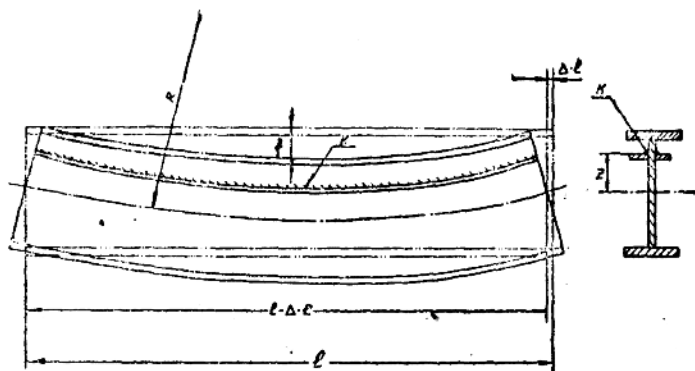


图 7 由于纵向焊缝所引起的构件的变形

沿构件轴线的相对纵向收缩由下式求得：

$$\Delta = 3.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{q_n}{F},$$

式中：

$F$ ——构件横断面面积(平方公分)。

用电流强度、电弧电压及焊接速度表示的单位长度热量的公式已在前面述过(第3节)。

单位长度热量也可用焊缝尺寸来表示：

$$q_n = 2 A \cdot \eta \cdot \frac{U K^2}{\alpha_H},$$

其中： $A$ ——与焊缝形状有关的常数：对于凸出缝 $A=4000$ ，对于正常缝 $A=3400$ ；

$K$ ——焊缝直角边长(焊缝高度)(公分)；

$U$ ——电弧电压(伏)；

$\alpha_H$ ——焊着系数(克/安-小时)；

$\eta$ ——电弧热效率(对于角缝 $\eta=0.55$ )。

构件挠度  $f$  可以根据曲率  $C$  与焊缝长度  $L$  按下式确定之：

$$f = \frac{CL^2}{8}。$$

上述公式表明：增加单位长度热量则焊件变形也增加，而增加构件的横断面尺寸则可以减少变形。

增加焊缝尺寸也会引起变形的巨大增加，因此在设计焊接结构时不要采用过大尺寸的焊缝，这一点是很重要的。在制造结构时也不允许随便地增加焊缝尺寸。

弯曲变形与焊缝长度的平方成正比地增加。因此，为了减少弯曲，最好减少结构单元的长度。

焊缝离焊件轴线越远，其弯曲就越大。为了减少弯曲，最好采用对称分布的焊缝。

#### 4. 变形与应力的作用

焊接变形与应力虽然是由同一原因所引起的，但是它们在结构中却是以不同的情形出现的。

焊接变形大并不意味着焊接应力很高。常常相反，焊件中变形可能不大，而应力却很高。这是因为应力只与弹性变形有关，而弹性变形比剩余变形要小得多。

对于焊件强度来说，变形与应力的作用也是不同的。

个别焊件形状的歪曲由于需要附加的劳动工序（连接处的修整），使焊接结构的制造工作大大地复杂化了。这样就会增加非生产性支出。此外，结构构件形状的歪曲可能在现有的工作条件之下无法矫正，以致在个别区段内会引起超应力。

例如，受拉焊件的弯曲（图 8 a）会引起附加应力。工字梁翼缘的局部变形会在个别断面内引起应力的重分布和应力的局部集中，这时，最大应力可能大大地超过其平均值（图 8 b）。

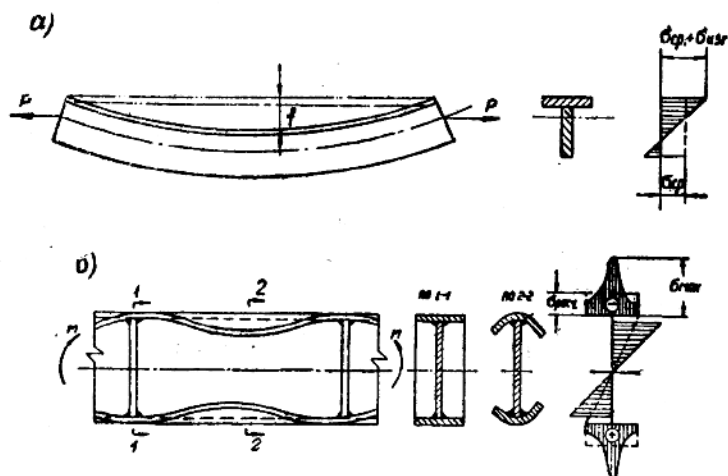


图 8. 在有剩余变形的构件中因荷载而产生的应力  
a—拉伸时；b—弯曲时

这样，焊接变形对于结构起着有害的影响，因为除了增加制造的劳动量以外，还可能引起焊接结构强度的降低。

因此，制造焊接结构时必须采取防止变形的措施，或将其限制在一定的界限以内，变形在这种界限内将不会有很大影响。

为了估计焊接应力对结构工作能力的影响，我们来研究一下有剩余应力的焊接构件的加荷过程。为着简单起见，我们只研究有纵向焊缝的钢板（图 9）。

焊接完毕之后，在钢板内产生了平衡的剩余应力（图 9 b），一般这种应力在焊缝区域内所达到的值与流限相等。

如果钢板材料具有足够的塑性——如低碳钢，其拉伸图上有流幅（图 2 a）——则当板子受拉力  $P$  作用时，其横断面中间部分的应力将不会增加，因为中间部分的材料已处于塑性状态，并不会引起对拉伸的阻抗。只有构件边缘区段才有对拉力作用的阻抗，因